# L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

E. HOSPITALIER
Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

J.-A. MONTPELLIER
Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION
*D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS*

TOME III (Fascicules 12 à 15)

Electrochimie, Électrométallurgie, Mesures et Applications diverses

PARIS
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49
TÉLÉPHONE 147-92

1902

# L'ÉLECTRICITÉ

## à l'Exposition de 1900

---

TOME III

TOURS. — IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES, 6, RUE GAMBETTA

# L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

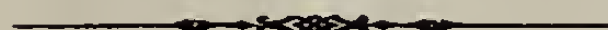

**E. HOSPITALIER**
Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*



**J.-A. MONTPELLIER**
Rédacteur en chef de *l'Electricien*


AVEC LA COLLABORATION

*D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS*



TOME III (Fascicules 12 a 15)

**Électrochimie, Électrométallurgie, Mesures et Applications diverses**




PARIS

Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

TÉLÉPHONE 147.92

1902

# L'ÉLECTRICITÉ

A

# L'EXPOSITION DE 1900

---

## DOUZIÈME PARTIE

## ÉLECTROCHIMIE ET ÉLECTROMÉTALLURGIE

### GÉNÉRALITÉS

Dans une Exposition d'appareils, mettons d'appareils électriques, il est en général très intéressant de décrire les appareils eux-mêmes, c'est-à-dire les objets exposés, puisque le but des expositions est précisément de montrer des nouveautés. Cela n'est plus la même chose si l'on considère une exposition de produits chimiques. Ici, ce qui est intéressant, ce n'est plus le produit exposé, presque toujours semblable à celui de la vitrine voisine, le mode de présentation seul variant, en général, d'une vitrine à l'autre. Ce qui est intéressant, c'est l'appareil, c'est le procédé qui a donné connaissance au produit exposé. Mais, le plus souvent, l'appareil ne figure pas et le procédé ne peut s'exposer.

La description d'une exposition consiste donc, non dans la nomenclature pure et simple des produits, mais dans la description des procédés et appareils employés.

On peut dire qu'à l'Exposition de 1900, l'Électrochimie nous apportait, à proprement parler, des nouveautés puisque, en dehors de l'industrie des dépôts électrochimiques et de la galvanoplastie, datant de près d'un demi-siècle, elle a fait son entrée officielle dans le monde.

Il est certain cependant que cette entrée n'a pas été aussi brillante que l'on aurait pu le souhaiter, tout au moins pour quelques spécialités et notamment pour l'industrie des alcalis et du chlore. Les quelques bocaux de potasse et de soude que l'on voyait par-ci par-là ne démontraient pas forcément que cette industrie est bien prospère; la plupart des échantillons auraient tout aussi bien pu représenter le résultat d'un travail de laboratoire que celui d'une opération industrielle.

Rien n'indiquait *a priori* quelle pouvait être l'importance de ces industries, sauf une série de photographies de la maison Solvay, dont deux que nous reproduisons plus loin (*fig.* 50 et 51) donnaient une idée des salles d'électrolyse de deux usines exploitant le procédé Castner-Kellner.

L'Exposition a permis d'admirer les belles pièces obtenues par le procédé Elmore ; elle a montré l'importance actuelle de la fabrication de l'aluminium et vulgarisé le procédé de l'aluminothermie ; elle a mis en relief l'importance de la fabrication des chlorates.

Dans le fascicule *Électrothermie*, nous avons parlé de l'industrie du carbure de calcium et autres produits obtenus au four électrique.

Il y a lieu de faire observer que l'Exposition française était particulièrement remarquable et que, par contre, l'Exposition des États-Unis, pays où l'on a cependant fait grand bruit autour des applications de l'électricité à la chimie, était absolument insignifiante.

## INSTALLATION DE LA CLASSE 24

La classe 24 était installée au premier étage du Palais de l'Électricité, entre la portion principale de celui-ci et le Palais de l'Alimentation. Sauf trois expositions situées au centre, celle de la Société d'Électrochimie, celle de la Société des Carbures Métalliques et celle de la Compagnie des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue, cette partie était réservée aux piles, accumulateurs et dépôts électrochimiques.

La maison Christophle avait installé derrière sa magnifique exposition un petit atelier de dorure, argenture et nickelage.

## INSTALLATION DE L'ANNEXE

L'annexe était formée d'un vaste hangar avec une galerie située à mi-hauteur et placée dans le fond; on accédait à cette galerie par deux escaliers latéraux.




Fig. 1. — Carte de France donnant la situation des principales usines électrochimiques et électrométallurgiques.

Au rez-de-chaussée se trouvaient le four électrique de M. Moissan et l'exposition de son laboratoire, les fours électriques de la Société des Carbures Métalliques et de la Compagnie électrométallurgique des procédés Gin et Leleux, l'exposition des produits bruts (aluminium) de la Compagnie des produits chimiques d'Alais et de la Camargue; enfin, un espace était réservé à la Société d'Électrochimie pour ses expériences sur l'Aluminothermie.

Autour de l'espace renfermant les stands de ces Sociétés se trouvait un passage et, dans le fond, les vitrines des autres exposants.

Au premier étage se trouvait une vitrine renfermant différentes expositions et une collection d'ouvrages et d'autographes d'électrochimistes. On y remarquait également un groupe en aluminium, coulé dès l'apparition commerciale de ce métal, par la maison Christophle, et un canon en bronze d'aluminium.

Sur le mur situé au fond de l'annexe et au-dessus de la galerie se trouvaient une grande carte de France (*fig.* 1 et 2) avec la position des différentes usines électrochimiques et un graphique (*fig.* 3) de la puissance consacrée en France à l'électrochimie et à l'électrométallurgie depuis une dizaine d'années. Le tableau suivant donne les chiffres de ce graphique :

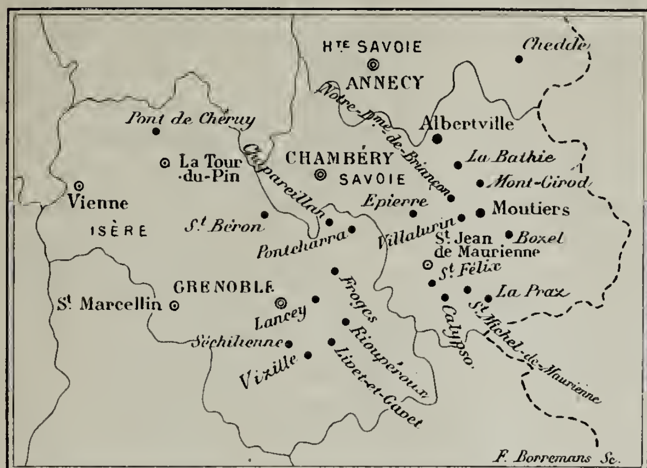



Fig. 2. — Détail de la carte précédente pour le Dauphiné et la Savoie.

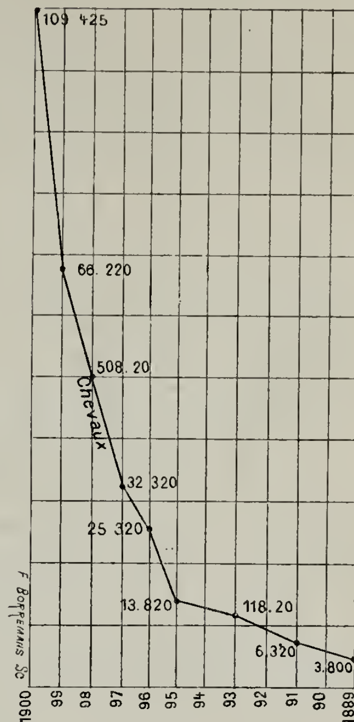



Fig. 3. — Tableau montrant l'accroissement de la puissance des usines électrochimiques et électrométallurgiques en France.

| | | |
|---|---|---|
| 1889 | 3 800 | chevaux |
| 1891 | 6 320 | — |
| 1893 | 11 820 | — |
| 1895 | 13 820 | — |
| 1896 | 23 320 | — |
| 1897 | 32 320 | — |
| 1898 | 50 820 | — |
| 1899 | 66 920 | — |
| 1900 | 109 425 | — |

On remarque la progression rapide des dernières années, due principalement à ce que l'on pourrait appeler la « fièvre du carbure ».

Il est malheureusement à craindre que la puissance atteinte en 1900 ne soit un maximum.

Adossés à ce même mur se trouvaient les bustes de Davy, Ampère, Becquerel, Volta, Jacobi et Faraday.

Enfin, les autres murs étaient garnis de panoplies d'objets divers en aluminium, objets nickelés, argentés, en cuivre électrolytique, etc., de graphiques, figures, plans, photographies de toutes sortes.

## INSTALLATIONS DE LABORATOIRES

**École de Physique et de Chimie de Paris.** — L'École de Physique et de Chimie industrielles faisait figurer, dans le pavillon de la Ville de Paris, les plans de la nouvelle école, dans laquelle une place importante est réservée à l'Électrochimie et à l'Électrométallurgie. Dans la brochure écrite par son éminent directeur, M. Lauth, à l'occasion de l'Exposition, ces plan sont reproduits ainsi que le programme de l'enseignement actuel. Voici, d'après ce rapport, les textes relatifs à l'enseignement de l'électrochimie :

« A gauche du pavillon de l'administration se trouvent les services de la quatrième année (laboratoires d'études et de recherches) et le laboratoire d'électrochimie qui est complété par une annexe à angle droit sur la cour. La façade de ce bâtiment sur la rue Vauquelin a une longueur de 32 mètres. — Services de la quatrième année : au rez-de-chaussée : laboratoire pour vingt élèves ; salle des balances ; verrerie ; cabinet et laboratoire du chef des travaux. — Laboratoire d'électrochimie : au sous-sol : salle des fours électriques ; salles d'analyse des gaz, des combustions, des fours Perrot et des bains d'huile ; magasins et verrerie. Au rez-de-chaussée : laboratoire pour trente élèves ; salle des balances et des mesures de précision ; salle spéciale pour l'hydrogène sulfuré. Au premier étage : cabinet et laboratoire du professeur ; laboratoire du chef des travaux ; bibliothèque ; grande salle des collections. Logement du garçon de laboratoire[1]. »

Au sujet des nouvelles branches enseignées à l'école depuis sa fondation (p. 31) :

« L'électrochimie s'est développée dans ces dernières années avec une puissance et une rapidité telles qu'elle semble destinée à transformer la science chimique et bouleverser toutes nos industries. Il eût été impossible de ne pas lui créer une place dans nos programmes. Dans la nouvelle école, un bâtiment spécial et une importante installation permettront de donner à cette science tous les développements qu'elle comporte ; mais nous n'avons pas cru pouvoir, en face des résultats merveilleux qu'elle a atteints, retarder l'organisation de cet enseignement dont nos élèves, familiarisés comme ils le sont avec les expériences de physique et spécialement celles qui utilisent les forces électriques, sont, plus que d'autres, capables de profiter. Un laboratoire d'électrochimie a donc été créé dès l'an dernier, à l'école ; il a été organisé sous la direction de M. le professeur Combes, qui s'est occupé spécialement de ces questions.

L'installation de ce service, confinant au laboratoire de quatrième année (études et recherches), comprend :

1° Un hangar aménagé spécialement à cet effet, en communication avec les différentes salles de machines de l'école, pour la charge de la batterie d'accumulateurs. Celle-ci est composée de 48 éléments système Blot, d'une capacité de 250 ampères-heure. Ils sont montés par 12 en tension. Un coupleur permet de mettre ces quatre groupes en tension ou en quantité et de disposer à volonté des multiples de 6 volts jusqu'à 96. Ce coupleur sert de tableau de distribution pour les services annexes : four électrique, opérations industrielles, etc. et permet d'envoyer, au moyen de 6 fils, le courant à un second coupleur situé dans le laboratoire. Cinq de ces fils permettent de travailler d'une façon constante sur 6, 12, 18 et 24 volts ; le sixième permet d'employer tous les multiples de 6 jusqu'à 96 volts ;

2° Une salle qui comprend dix postes, moitié sous une hotte, moitié sur une table. Six de ces postes sont établis avec des tableaux présentant l'outillage complet pour les recherches et notamment un voltmètre de précision à deux sensibilités (2,5 volts, 12,5 volts) au centième et un ampèremètre de précision, au centième, muni de 3 shunts permettant de lire pour tout le cadran : 1, 10 et 50 ampères. Les autres postes comprennent simplement deux bornes et sont destinés à des montages divers.

1. Ce projet a été modifié depuis ; en ce qui concerne l'électrochimie, le plan comprend : au sous-sol, les salles de machines, de fours électriques, d'accumulateurs, et trois petits laboratoires pour la fabrication des alcalis, l'électrolyse par fusion ignée, l'électrométallurgie par voie humide ; au rez-de-chaussée : laboratoires du chef des travaux et du sous-chef, un grand et un petit laboratoire d'élèves, une salle de mesures, salle de balances, ateliers, et d'autres pièces utilisées en commun avec le service d'Études et de Recherches.

Cette grande salle renferme une petite pièce avec deux balances de précision (300 gr au 1/10 de milligramme et 1,500 kg au 1/2 centigramme), un ampèremètre-enregistreur, un compteur de quantité, un ohmmètre, etc. Elle renferme également le coupleur, une bibliothèque électrochimique, les collections de produits, appareils, etc. On doit y adjoindre, en outre, une salle de mesures : résistance des électrolytes, forces électromotrices de polarisation, etc.

Cette installation sera complétée par une collection des principaux types d'appareils industriels et notamment ceux qui servent à la fabrication de l'ozone et des accumulateurs.

Quand M. Combes, pour des raisons de convenance personnelle, donna sa démission de professeur, M. Brochet, docteur ès sciences, ancien élève de l'école, se chargea d'exposer, dans une série de conférences, les principes ainsi que les applications industrielles de l'électrochimie et de diriger dans le laboratoire, récemment créé, les exercices pratiques qui dérivent de cette nouvelle branche de la science. »

Le programme des manipulations est le suivant :

1° Étude du voltamètre à cuivre et du voltamètre à argent ;

Étude du voltamètre à gaz tonnant.

Ces deux manipulations sont faites simultanément et les résultats comparés avec les valeurs indiquées par l'ampèremètre.

2° Relation entre la différence de potentiel aux bornes, l'intensité du courant, la surface des électrodes et leur distance, la nature des électrolytes et leur concentration, la température, etc.

3° Étude de l'influence de la densité de courant sur les réactions secondaires :

*a.* Application à l'acide oxalique ;

*b.* Application au sulfate ferroso-ferrique.

4° Étude de la résistance de divers charbons, employés comme électrodes, à l'action des électrolytes.

5° Étude de l'électrolyse des solutions salées :

*a.* Application à ces réactions de la méthode d'Œttel ;

*b.* Influence de la densité de courant, de la température, de la concentration des solutions ;

*c.* Préparation des chlorates ;

*d.* Préparation des hypochlorites.

6° Étude de la formation de l'acide persulfurique :

Influence de la concentration de l'acide, de la température, de la densité de courant, etc.

7° Préparation du chlore et de la soude :

*a.* Avec un diaphragme ;

*b.* Avec une cathode en mercure ;

*c.* Avec une cathode-filtre.

8° Préparation de produits minéraux :

Iodate de potassium. — Bromate de potassium. — Persulfates de potassium, d'ammonium. — Chromate, bichromate, ferricyanure, permanganate de potassium.

Couleurs minérales : vert de Scheele, jaune de cadmium, céruse, vermillon, etc.

Extraction et affinage des métaux : cuivre, zinc, plomb, étain.

Emploi des sulfures comme anodes solubles.

9° Préparation de produits organiques :

Azobenzène. — Hydrazobenzène. — Benzidine. — Paramidophénol et dérivé sulfoné. — Alcool paranitro-benzylique. — Réduction et oxydation des dérivés nitrés. — Iodoforme. — Tribromophénol. — Chlorobenzène (réaction Sandmeyer).

10° Électrolyse par fusion ignée :

Préparation de différents métaux et alliages :

Aluminium, magnésium, lithium, glucinium, plomb-sodium, sodium.

11° Four électrique :

Fusion et volatilisation des oxydes : chaux, baryte, alumine.

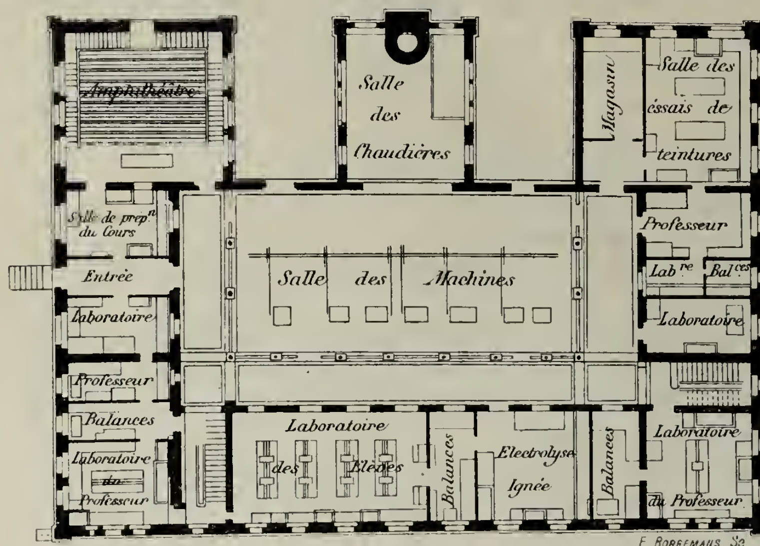
Préparation des carbures de calcium, de lithium, etc.

Préparation des métaux : chrome, manganèse, etc.

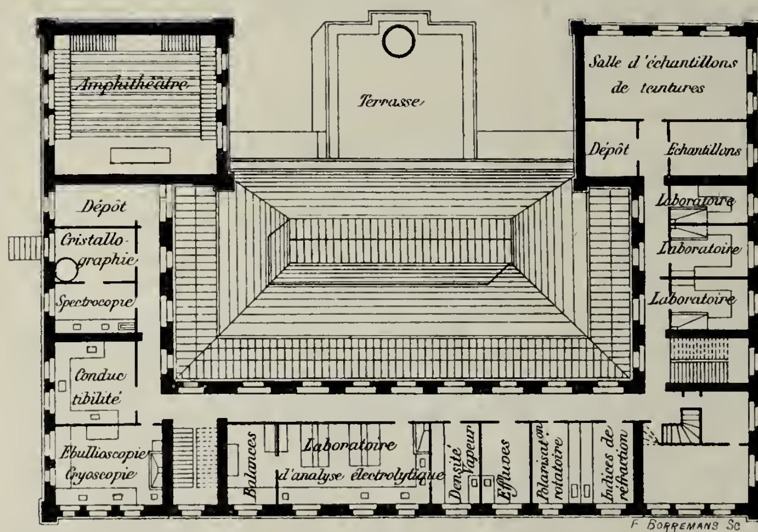
12° Préparation et applications de l'ozone.

13° Fabrication des accumulateurs.

**Faculté des Sciences de Nancy.** — La Faculté des Sciences de l'Université de Nancy exposait dans la classe 3 (Enseignement supérieur, institutions scientifiques) les plans de son Institut chimique.




Rez-de-chaussée.




Premier étage.

Fig. 4 et 5. — Plans du service d'électrochimie à l'Institut chimique de Nancy.

Celui-ci a été fondé sur l'initiative de MM. Dumont et Liard, successivement directeurs de l'enseignement supérieur.

« Des subventions fournies par les deniers publics permirent d'édifier un premier établissement vaste, bien aménagé, comprenant toutes les ressources dont doivent disposer aujourd'hui les laboratoires sérieux. Cet établissement fut placé sous la direction de M. Haller, titulaire de

la chaire de chimie générale, dont l'initiative, l'activité et les vastes connaissances avaient grandement contribué déjà à la nouvelle fondation.

L'Institut chimique était à peine achevé que l'on voyait déjà naître et prospérer à l'étranger de nouvelles branches de la science chimique, dont l'étude exige un matériel spécial et important. Les premières installations n'étaient pas en état de répondre à ces besoins, qui, d'ailleurs, n'avaient pas été prévus, puisqu'ils n'existaient pas alors ; on manquait de place, de machines et avant tout d'argent. Pour ne pas rester en arrière des établissements similaires de l'étranger, M. Haller conçut alors le projet, audacieux dans notre pays et nouveau pour nos habitudes, d'associer à son œuvre nos établissements industriels, nos financiers, nos hommes d'affaires ; il entreprit d'établir d'une manière effective l'alliance tant préconisée de la science universitaire et de l'industrie, deux sœurs qui, chez nous du moins, ne se tendaient naguère encore que bien timidement la main. »

« Le succès répondit à ses efforts ; ses appels vibrants furent entendus. L'infatigable directeur eut la joie d'ajouter au premier Institut chimique de vastes laboratoires, comprenant les sciences d'électrochimie, de chimie physique, de teinture et d'impression, le tout parfaitement outillé et aménagé. »

L'Institut électrochimique (*fig.* 4 et 5) contient, au centre, une vaste salle de machines où sont disposées huit dynamos; les réceptrices sont alimentées par le courant de la ville et actionnent les génératrices, dont les plus puissantes sont de 45 kilowatts. Il y a, en outre, un moteur à gaz de secours. Un tableau central permet d'envoyer à volonté le courant fourni par ces machines dans un amphithéâtre spécial ou dans les laboratoires qui entourent la salle. Le four électrique, les électrolyses par voie ignée et par voie humide, les recherches d'électrochimie théorique, l'analyse électrolytique y possèdent des pièces spéciales pour les maîtres et pour les élèves. L'établissement est également pourvu de plusieurs batteries d'accumulateurs.

L'enseignement théorique y est donné par M. P.-Th. Muller, à raison d'une heure par semaine pendant les deux premières années pour la chimie physique et une heure par semaine pour l'électrochimie en deuxième et troisième années.

**Places de travail et tableaux de distribution.** — L'École de Physique et de Chimie industrielles exposait, dans le pavillon de la Ville de Paris, le modèle d'un tableau correspondant à une place de travail (*fig.* 6). A la partie supérieure se trouvent 2 bornes d'arrivée de courant communiquant avec un damier à mercure permettant de prendre 6, 12, 18, etc., jusqu'à 96 volts à la batterie d'accumulateurs. La barre de gauche, correspondant au pôle positif, porte un interrupteur double à plomb fusible. Sur la barre de droite, on peut installer un shunt d'ampèremètre enregistreur ; elle communique ensuite avec une série de quatre shunts pour 1, 5, 10 et 50 ampères, à la suite desquels se trouve une série de plombs fusibles correspondants ; un commutateur permet de mettre en circuit le shunt approprié.

Une barre munie de deux bornes permet de fixer le fil négatif de l'électrolyseur avec le fil positif du rhéostat, par exemple, ce qui rend les deux appareils totalement indépendants l'un de l'autre. Le 5^e^ shunt, situé à la partie inférieure, communique par un fil passant derrière le tableau, avec la 2^e^ borne du bas. On peut donc disposer aux bornes 1 et 2, en commençant par la gauche, d'un second circuit en dérivation sur le premier, arrivant aux bornes 3 et 4 ou 5 et 6.

A la partie supérieure du tableau se trouve un voltmètre à plusieurs sensibilités, 3, 15, 30, 150 volts, et un ampèremètre permettant de mesurer sur ce tableau depuis 0,01 à 50 ampères. Aux bornes d'arrivée et de prise de courant se trouvent des lames de plomb pour mesurer la tension au moyen d'une poignée (sur le côté gauche du tableau) munie de deux tiges de cuivre communiquant avec les bornes du voltmètre. Pour mesurer la tension aux bornes de l'électrolyseur lui-même, celles-ci communiquent avec deux lames de plomb fixées sur une planchette et séparées par une baguette isolante. Ce dispositif est particulièrement commode lorsque l'on fait des essais en série.

L'Institut Royal de Physicochimie et d'Électrochimie de Gœttingue a cherché à représenter, sous forme d'une place de travail pour électrochimiste, un certain nombre d'appareils et de dispositifs imaginés dans ses laboratoires.

La table de chêne a été munie d'une vitrine protectrice; elle est semblable à celles employées dans les laboratoires de Gœttingue. Elle est munie de gaz, d'eau et d'une étagère à réactifs. Le

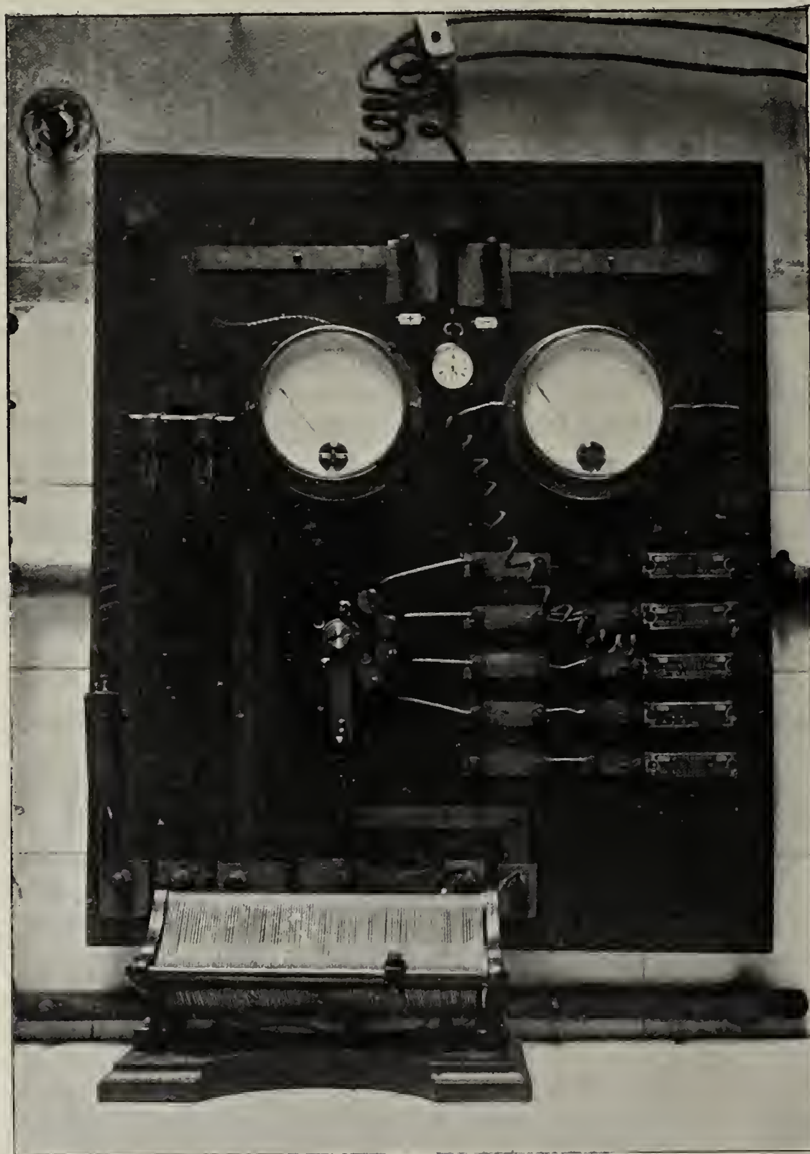


Fig. 6. — Place de travail de l'École de Physique et de Chimie industrielles.

courant utilisable est amené par des bornes situées sur le fond de la table; il en existe deux séries. La première série correspond à une batterie d'accumulateurs de grande capacité et, suivant les bornes utilisées, on peut mettre en circuit, 1, 2, 3, 4 ou 5 accumulateurs et obtenir 2, 4, 6, 8 ou 10 volts.

L'autre série de bornes permet d'obtenir 70, 150 et 220 volts, soit pour le travail au four électrique, soit pour toute autre recherche. Un interrupteur à maximum de Ruhstrat frères, de

Gœttingue, permet de couper automatiquement le courant dès que l'on dépasse un nombre d'ampères fixé d'avance ; cet appareil est plus commode que les plombs fusibles et donne plus de précision.

Adossés au mur se trouvent deux tableaux des équivalents et des tensions de solution, calculés d'après les travaux exécutés à l'Institut par M. Wilsmore, et une photographie de l'Institut.

Parmi les dispositifs ou appareils se trouvant sur la table, nous mentionnerons :

1° Le dispositif pour la détermination des points de décomposition :

Un tube de verre en U contient, d'un côté, une grande électrode et, de l'autre, une pointe de platine à laquelle sera isolé l'ion étudié. On peut ainsi étudier séparément les tensions de polarisation à l'anode et à la cathode. En reliant les deux électrodes à un pont à cylindre auquel le courant est fourni par un petit accumulateur, on fait ainsi varier progressivement la tension aux bornes.

L'intensité du courant traversant l'électrolyseur dépend surtout de la tension de polarisation à la pointe de platine. Cette pointe peut, suivant les cas, servir de cathode ou d'anode. Le point de décomposition initial se traduit à un galvanomètre d'Arsonval (modèle à miroir et lunette, de Edelmann, de Munich) (Voir fascicule 13, p. 16) par un renforcement subit du courant.

Le point de décomposition est mesuré par rapport à une électrode normale d'hydrogène formée d'une lame de platine platinée baignée d'hydrogène se trouvant dans une tubulure latérale. L'hydrogène produit dans un appareil de Kipp est purifié par barbotage dans des solutions acide et alcaline de permanganate.

La mesure est effectuée par la méthode des compensations de Poggendorff au moyen d'un galvanomètre à aiguille de Keyser et Schmidt et d'une boîte de résistances. Ce dispositif a permis d'effectuer les recherches de Nernst et Glaser sur la décomposition des solutions aqueuses, de Wohlwill sur l'électrolyse des chlorures alcalins, de Bose sur les tensions de décomposition, etc., de Dony-Hénault sur la synthèse de substances organiques et notamment sur la formation de l'iodoforme, etc.

2° Le dispositif pour la détermination des constantes diélectriques par la méthode de Nernst :

Un pont de Wheatstone porte sur deux branches des résistances liquides impolarisables et, sur chacune des autres, une résistance et un condensateur variables et mesurables à volonté.

Ce dispositif permet également de mesurer les conductibilités très faibles, en utilisant comme récipient un appareil tubulaire, muni d'un thermomètre, permettant d'obtenir les différents degrés de dilution voulus sans avoir à le vider.

On ne peut, avec l'appareil précédent, mesurer la constante diélectrique des liquides dont la conductibilité dépasse $2 \times 10^{-10}$, la forte polarisation de la cuve électrolytique troublant la mesure.

M. Nernst a montré que, si l'on remplace les oscillations lentes de l'inducteur par des oscillations électriques rapides, le mesure devient possible, même pour une conductibilité dix fois plus grande. Le dispositif permettant d'obtenir ces oscillations électriques rapides est également exposé.

3° Appareil pour la confirmation de la théorie osmotique de la génération du courant galvanique au moyen des électrodes à gouttes :

D'un réservoir à mercure se trouvant à la partie supérieure d'une solution de chlorure de potassium saturée de chlorure mercureux tombe goutte à goutte du mercure. Aussitôt qu'une goutte de mercure sort de l'électrode, des ions mercureux se précipitent sur elle, car le mercure possède une très faible tension de solution. La goutte tombe alors sur le mercure placé au fond du récipient et s'y incorpore en cédant ses ions mercureux dans la zone inférieure, tandis qu'elle s'est appauvrie, au contraire, dans le voisinage de l'électrode à goutte. Ces changements de concentration se mesurent par la détermination de la différence de potentiel de la couche supérieure et de la couche inférieure et d'une électrode constante. Ces essais ont été faits à Gœttingue par M. Palmaer.

4° Piles galvaniques de liquides et de concentrations :

Série de petits récipients en forme d'H, remplis de l'électrolyte à étudier et mis en communication par de petites anses capillaires ne permettant pas le mélange par diffusion.

5° Installation d'analyse électrolytique au moyen d'une pile thermo-électrique de Gülcher, dont on prend la tension désirable en réunissant les pôles par un shunt variable.

6° Appareil de cours pour montrer la migration des ions :

Dans un tube en U, on superpose au moyen d'un entonnoir à robinet une solution de permanganate de potasse, dont la densité a été augmentée par addition d'urée. La surface de séparation est très nette. Si on électrolyse alors avec une tension élevée, on voit la surface de séparation se déplacer en sens inverse du courant. D'après la différence des niveaux, on peut ainsi observer la vitesse de migration des ions et même la calculer.

7° Électromètre à cadran de Nernst et Dolezalek (Voir fascicule 13, p. 38).

8° Produits : peroxyde de cobalt et dépôt électrolytique de carbone.

MM. Poulenc, Meslans et Gaiffe exposaient, dans l'annexe et dans le laboratoire modèle du Palais des Mines et de la Métallurgie, un tableau pour analyses électrolytiques multiples.

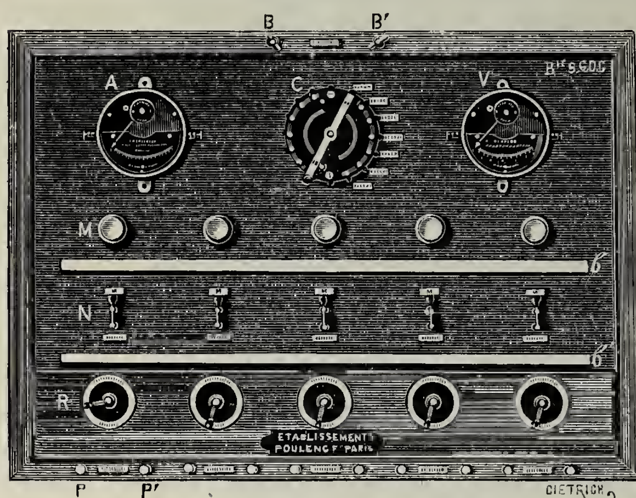



Fig. 7. — Tableau pour analyses électrolytiques de MM. C. Poulenc, Meslans et Gaiffe.

Le but de ce tableau est de permettre d'exécuter simultanément un grand nombre d'analyses électrolytiques diverses, en employant un courant unique, un seul voltmètre et un seul ampèremètre, et d'en suivre et maintenir avec précision les conditions de marche différentes pour chaque analyse, ces conditions pouvant ne pas être les mêmes pour chacune d'elles.

On sait combien l'observation scrupuleuse de ces données a d'importance pour l'exactitude des méthodes de séparation.

Lorsque l'on dispose d'une place suffisante et que le nombre des analyses demeure inférieur à huit ou dix, on peut employer les supports d'électrodes mobiles reliés au tableau au moyen de câbles souples ; mais, chaque fois qu'un nombre plus considérable d'analyses doit être exécuté ou que l'espace dont on dispose est restreint, il est bien préférable de fixer les supports directement sur le tableau, comme le montre la figure 9, ce qui supprime l'encombrement des câbles, et évite toute chance d'erreur ou de court-circuit. La figure 8 donne le schéma du montage.

B, B′ (*fig.* 7) sont les barres d'amenée du courant. Les manettes N servent à mettre en circuit entre les deux barres les réducteurs de potentiel R placés au-dessous d'elles et, pour chacune, un coupe-circuit à plomb fusible M pare à toute fausse manœuvre. Les réducteurs de potentiel R, à déplacement circulaire, permettent de faire varier d'une façon presque continue le voltage aux bornes de l'appareil d'électrolyse, depuis 0 jusqu'à 6 volts, qui est le voltage à recommander pour la source d'électricité reliée à B, B′. Une série de shunts identiques, reliés convenablement au commutateur central C, et le système de connexions établi au dos du tableau entre le commutateur et les deux appareils de mesure, permettent de connaître à tout moment la tension et l'intensité du courant pour une quelconque des analyses.

Ce commutateur porte, dans ce but, un nombre de plots égal à celui des postes d'analyses ; un chiffre placé près de chacun indique le numéro du poste auquel il correspond ; il suffit donc

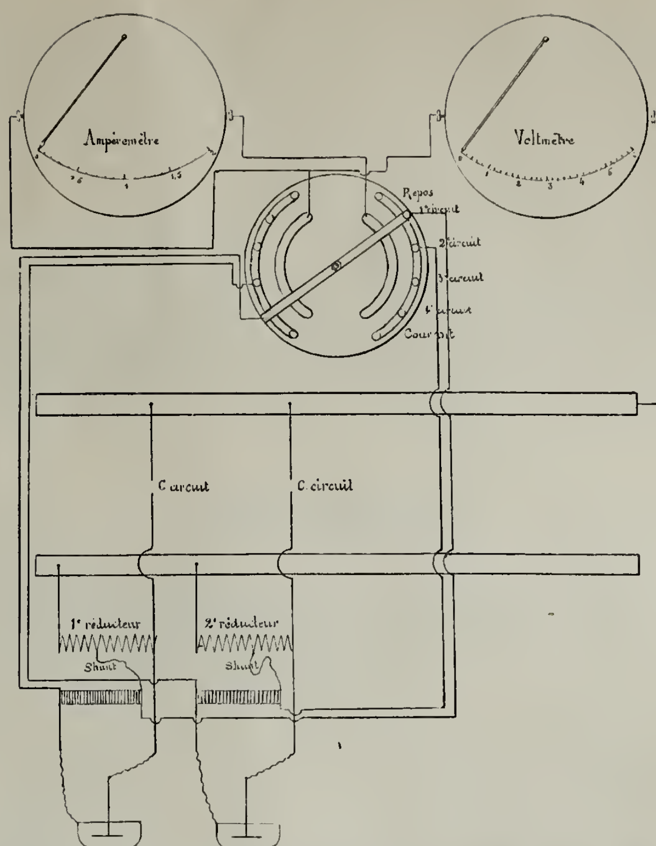



Fig. 8. — Schéma du tableau pour analyses électrolytiques de MM. C. Poulenc, Meslans et Gaiffe.

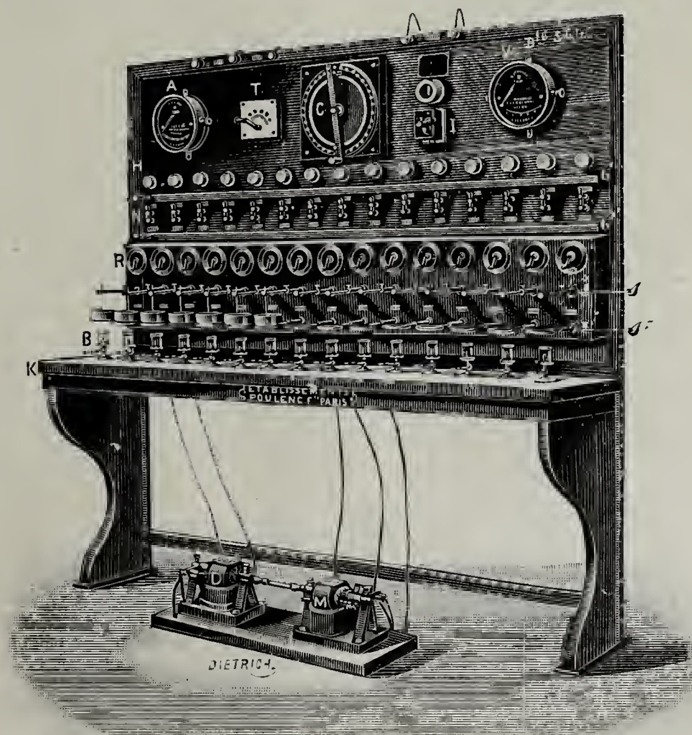



Fig. 9. — Installation complète pour analyses électrolytiques de MM. C. Poulenc, Meslans et Gaiffe.

d'amener la manette devant le numéro de l'analyse dont on veut suivre les conditions de marche pour que les appareils de mesure donnent aussitôt le voltage et l'intensité du courant de cette analyse ; une position est prévue pour la mesure de la tension entre les barres B, B'.

La figure 9 montre, en outre, le dispositif d'anneaux fixés sur le tableau pour y recevoir les capsules de platine, et de fiches à vis à double mouvement destinées à recevoir les tiges des anodes et à les centrer convenablement dans les capsules. Une rampe à gaz, à becs protégés par une cheminée de mica, permet de maintenir les bains d'électrolyse à la température convenable.

La même figure montre l'accouplement d'un moteur à 110 volts et d'une dynamo de 6 volts dans le but d'alimenter le tableau d'électrolyse avec le courant dont on dispose pour l'éclairage. Cet ensemble, grâce à un compoundage convenable, fournit un courant de grande constance dans des limites très étendues et sans que l'arrêt ou la mise en marche de plusieurs analyses fasse varier les conditions de marche des autres.

### INSTALLATIONS D'USINES

La plupart des Sociétés exposantes avaient tenu à montrer quelques détails de leur installation : nous citerons particulièrement la Société de l'usine d'Hasslund, près Sarpsborg (Norwège), qui faisait figurer dans le Palais de l'Electricité un modèle en relief de sa magnifique chute et de l'usine. La maison Corbin et C^ie^, de Chedde (Haute-Savoie), exposait dans la classe des Produits Chimiques un plan et une coupe des magnifiques chutes de l'Arve : celle du Chatelart, exploitée par la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée pour le chemin de fer électrique de Chamonix, et celle de Chedde, qu'elle utilise pour sa fabrication de chlorates.

Le reste était formé surtout de photographies d'usines, de différentes parties de chutes, etc. Nous citerons notamment : Compagnie électrométallurgique des procédés Gin et Leleux, qui exposait des vues de ses différentes installations à Méran (Tyrol), Saint-Beron (Isère), Villelongue (Hautes-Pyrénées), Kerrousse (Morbihan), Saint-Andrès-de-la-Barca et Esparraguera (Espagne), Cordoba (République Argentine), Milan et Isola del Lori (Italie), etc. ;

La Compagnie française des Carbures (usine de Sechilienne), la Compagnie générale d'Électrochimie (usine de Bozel, Savoie), Corbin et C^ie^ (usines de Lancey, Isère, et Chedde, Haute-Savoie). La Néo-Métallurgie (usine de Rochefort-sur-Mayenne), la Société l'Inexplosible (usine de Saint-Félix, Savoie), Société des Carbures Métalliques (usine de Notre-Dame-de-Briançon, Savoie), la Société d'Électrochimie (usines de Saint-Michel-de-Maurienne, Savoie, et Vallorbe, Suisse), la Société électrochimique du Giffre (usine du Giffre, Haute-Savoie), Société industrielle de l'Ozone (usine d'Emmerin, Nord), la Volta française (usine de Moutiers, Savoie), la Volta suisse (usine de Vernier, près Genève), etc. — MM. Schneider et C^ie^, du Creusot, faisaient figurer une collection complète des machines à courant continu ou alternatif qu'ils fabriquent pour l'électrochimie.

Enfin, parmi les photographies intéressantes, il faut citer celles de la maison Solvay et C^ie^, qui représentaient : Vue d'ensemble, salle de machines et salle d'électrolyse (*fig.* 50 et 51, p. 53) de l'usine de Jemeppe-sur-Sambre (Belgique) et de l'usine d'Osternienburg (Allemagne).

Les procédés en fonctionnement étaient :

Le traitement des minerais d'or au Transvaal et l'installation électrolytique de la « Siemens Electrolysis » de Berlin, en collaboration avec la « Rand Central Ore reduction C^o^ L^td^ » de Johannesburg (Voir p. 94) ;

La dorure et l'argenture de la maison Christophle (Voir p. 99) ;

La fabrication de l'ozone par le procédé Marmier et Abraham (Voir p. 132) ;

La fabrication du carbure de calcium par la Société des Carbures Métalliques (Voir fascicule *Électrothermie*, p. 40) et la Compagnie Électrométallurgique des procédés Gin et Leleux (Voir fascicule *Électrothermie*, p. 43) ;

L'aluminothermie par la Société d'Électrochimie (Voir p. 129);

Le four électrique de M. Moissan (Voir fascicule *Électrothermie*, p. 31 et suivantes) et celui de MM. Poulenc et Meslans (Voir *id.*, p. 39).

## APPAREILS

Comme nous l'avons dit, le nombre des appareils figurant à l'Exposition était relativement restreint; la plupart, ayant une application spéciale, seront décrits ultérieurement. Ce sont : les appareils à fluor de M. Moissan (p. 28), le voltamètre à gaz tonnant de M. Brochet (p. 27), l'électrolyseur Rhodin (p. 54), les appareils de M. Cowper-Coles pour le zingage électrolytique des tubes d'acier et la fabrication des miroirs paraboliques (p. 81, 86 et 114), l'appareil à hypochlorites de Kellner (p. 41), l'électrolyseur Hargreaves pour la fabrication des alcalis et du chlore (p. 56), etc.

Nous nous bornerons à décrire ici les appareils non classés pouvant se rapporter à toute réaction. Les dispositifs et appareils de mesure exposés par l'Institut royal de Chimie physique et d'Électrochimie de Gœttingue (Hanovre), ont été décrits en même temps que la salle de travail exposée par cet Institut (Voir p. 10).

M. Étard exposait dans l'annexe un appareil pour l'électrolyse sous pression.

Cet appareil se compose d'un tube en acier A (*fig.* 10) de 40 mm de diamètre extérieur, de 20 mm de diamètre intérieur et 65 cm de longueur.

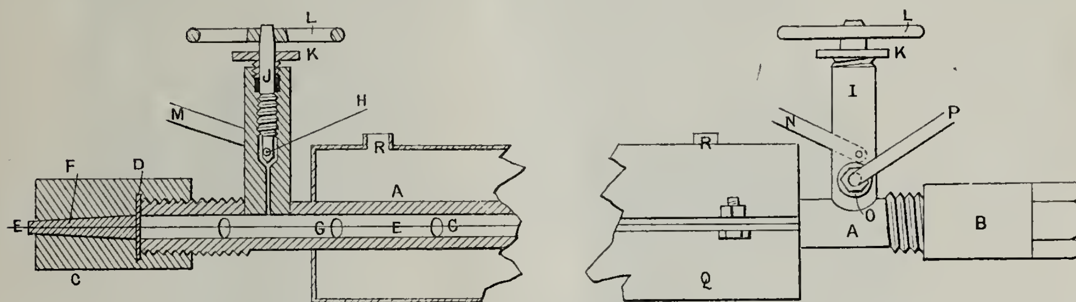



Fig. 10. — Appareil de M. Étard pour l'électrolyse sous pression.

Il est fermé à ses deux extrémités par des bouchons à vis B et C, permettant d'assurer l'étanchéité parfaite au moyen de lamelles de plomb D. Un de ces bouchons C est traversé par un fil servant d'électrode E, dont l'isolement par rapport à la masse de l'appareil est assuré au moyen d'une pièce tronconique F en émail. Ce fil est en platine; il est maintenu à une certaine distance du tube A, qui constitue la seconde électrode, au moyen de perles d'émail G.

Un dispositif permet d'assurer la circulation des liquides; il se compose de deux tubes H et I vissés dans le tube principal. Ces tubes sont munis de robinets à pointeau J, garnis de presse-étoupes K et pouvant être manœuvrés par une roue L; les tubes M et N communiquent soit avec un appareil à pression, une presse hydraulique par exemple, et avec un récipient destiné à recueillir le liquide électrolysé. L'ajutage des tubes M et N se trouve en arrière. Un ajutage O communique avec un manomètre par l'intermédiaire du tube P. Une enveloppe Q permet de maintenir l'appareil à une température déterminée par un dispositif quelconque (bain d'air, bain d'huile, bain de limaille, etc.); trois tubes R permettent de déterminer la température.

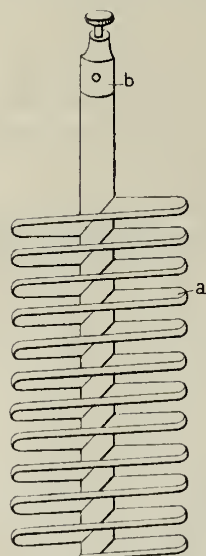
M. Peyrusson exposait dans l'annexe différents types de son électrolyseur caractérisé par la forme hélicoïdale des électrodes que les figures 11 et 12 représentent en élévation, tandis que la figure 13 montre en coupe verticale la vue de l'appareil complet.

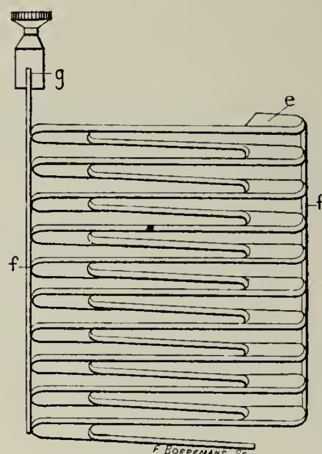
L'électrode intérieure, représentée isolée (*fig.* 11), est formée d'une hélice à lames larges et

rapprochées, enroulées autour d'une tige centrale, de telle sorte que l'électrolyte, qui arrive à la partie supérieure par le robinet K, est obligé de parcourir toutes les spires de cette hélice, en subissant progressivement et bien complètement l'action du courant électrique.

Cette électrode, munie d'une prise de courant *b*, est disposée à l'intérieur d'un vase poreux *c* qui doit avoir juste le même diamètre et qui peut communiquer à sa partie inférieure avec le robinet *d* pour la sortie de l'électrolyte.

L'électrode extérieure, que l'on voit séparée (*fig.* 12), est aussi constituée par une hélice *e*, ayant un vide central dans lequel s'ajuste le vase *c* destiné à recevoir l'électrode interne. Les spires de cette hélice sont reliées par des tiges extérieures *f*; mais elles peuvent aussi être composées de rondelles ayant chacune une spire d hélice à l'intérieur et reliées entre elles de façon à affecter la forme d'un appareil à colonne.




Électrode interne. Électrode externe.

Fig. 11 et 12. — Électrodes de l'appareil de M. Peyrusson.

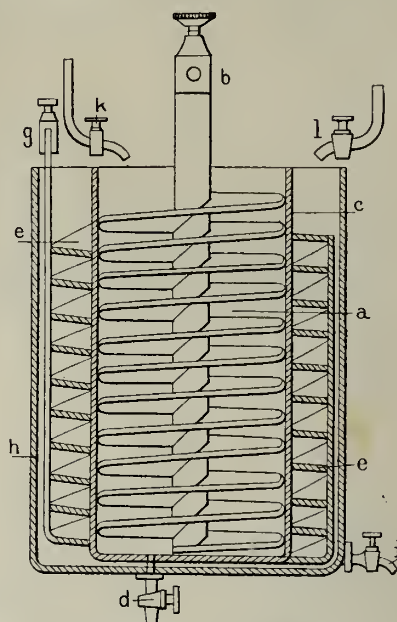



Fig. 13. — Appareil de M. Peyrusson à électrodes hélicoïdales.

Le fonctionnement de cet appareil est très simple : les robinets *k* et *l*, qui correspondent à des réservoirs d'alimentation, étant convenablement ouverts, les solutions à électrolyser arrivent dans l'appareil, le traversent en suivant les spires des électrodes et s'écoulent à la partie inférieure par les robinets *d* et *i*.

Cette forme hélicoïdale des électrodes présente le très grand avantage d'obliger les électrolytes à suivre tous les contours des hélices et, par conséquent, à faire dans l'appareil un parcours qui, suivant le rapprochement et la largeur des spires, peut facilement être cent fois plus grand que la longueur de l'axe de l'hélice. De plus, pendant ce long parcours, l'électrolyte se trouve soumis au courant électrique sous forme de tranches minces emprisonnées entre les lames de l'hélice et, par conséquent, dans les meilleures conditions pour en subir l'action d'une façon rationnelle et progressive. Ce résultat est encore favorisé par le mouvement du liquide et par le fait que chaque partie de l'électrolyte soumise au courant pendant le parcours de l'hélice est isolée et évacuée aussitôt l'effet désiré obtenu; il suffit pour cela de régler l'écoulement d'une façon rationnelle au moyen des robinets d'arrivée et de sortie.

On peut n'employer cette forme en hélice que pour une seule des électrodes (généralement l'extérieure), l'autre étant de forme quelconque.

Avec cet appareil, on peut facilement utiliser les actions produites à chaque électrode et même opérer en même temps sur deux électrolytes différents.

Les inconvénients des cloisons poreuses sont réduits au minimum par la forme même de appareil, puisqu'il suffit d'un cylindre pour séparer des électrodes de surface sept à huit fois plus considérable; de plus, cette forme cylindrique permet d'employer des rondelles s'emboîtant et peu coûteuses, même lorsqu'elles sont faites en composés spéciaux beaucoup moins attaquables. — Enfin, à la place de terre poreuse, on peut employer les autres matières usitées pour cet usage.

Le vase poreux qui contient l'électrode centrale peut facilement être fermé de façon qu'on puisse y faire une aspiration de 15 à 20 mm de mercure qui empêche l'osmose électrique, lorsque cette électrode joue le rôle d'anode et permet d'obtenir facilement séparés les produits gazeux qui peuvent se dégager.

Dans cet appareil, l'électrolyte se trouve tout naturellement à l'abri de l'air.

Malgré le vase poreux, la résistance électrique est très faible, d'abord à cause de la grande surface des électrodes sous un faible volume, mais aussi par suite de l'agitation continue dans toutes les parties de l'électrolyte, agitation qui est produite tout simplement et tout naturellement par le fait de l'écoulement du liquide.

## MATÉRIEL D'ÉLECTROCHIMIE

Bacs d'électrolyse. — Le verre et la porcelaine, à peu près exclusivement employés dans les laboratoires, n'ont d'applications industrielles que dans des cas spéciaux. Le grès convient très bien pour tous les appareils industriels de dimensions restreintes. La lave de Volvic peut être employée à beaucoup d'usages, mais a l'inconvénient de coûter assez cher.

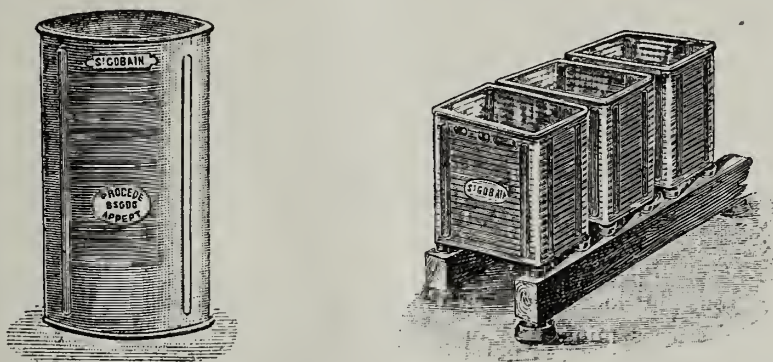



Fig. 14 et 15. — Bacs des Manufactures de Saint-Gobain, Chauny et Cirey.

Le bois est couramment employé dans les cuves de grandes dimensions, notamment l'affinage des métaux, les dépôts électrochimiques, etc. Les cuves peuvent être doublées de plomb ou enduites à froid ou à chaud de différents produits destinés à les rendre imperméables et inattaquables. On peut également imprégner le bois de paraffine ou de cérésine, en le chauffant pendant un certain temps à 150° dans un bain de ces substances, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de dégagements gazeux dus à l'air et à l'humidité.

Un produit qui tend à prendre de plus en plus d'extension pour la confection des bacs d'électrolyse est le ciment et notamment le ciment armé. On peut aussi réaliser toutes les formes désirées avec des parois relativement minces. Il faut prendre la précaution, notamment dans le cas du ciment armé, d'imperméabiliser pour éviter les dérivations.

Dans les usines importantes, dans lesquelles un grand nombre de bains sont montés en tension et qui utilisent de ce fait des machines à tension élevée, les cuves et les planches sur lesquelles circulent les ouvriers employés au travail de l'électrolyse doivent être montées sur des isolateurs analogues à ceux employés pour les accumulateurs.

Enfin, on peut employer des bacs métalliques, dont la paroi constitue l'une des électrodes

Naturellement, ces bacs à électrolyse ont des formes variées à l'infini et se rapportent e général chacun à une fabrication spéciale. Leur exposition ne pouvait offrir qu'un intér relatif.

Parmi les objets exposés, signalons, dans la « Collectivité allemande de l'Industri chimique », la cuve en grès à rainures exposée par la « Thonwaarenwerk Bettenhausen » d Cassel, et qui est utilisée dans l'appareil Kellner (Voir p. 41).

Les Manufactures de Glaces et Produits chimiques de Saint-Gobain, Chauny et Cire exposaient des bacs en verre moulé par le procédé Appert (*fig.* 14 et 15), pouvant avoir quelque applications dans l'électrolyse, mais qui sont principalement utilisés comme bacs d'accumula teurs, des isolateurs, crémaillères, plaques à rainures, tasseaux, etc.

Diaphragmes. — Le diaphragme est la partie de l'électrolyseur qui empêche les anions e les cathions ou, du moins, les produits qui en dérivent, de réagir les uns sur les autres.

Les premiers diaphragmes employés en électrolyse furent les vases à piles fabriqués e faïence poreuse (terre de pipe).

Ces diaphragmes, qui résistent bien aux acides, sont malheureusement attaqués par le alcalis d'une façon énergique. Il est probable cependant qu'en modifiant la constitution de pâtes, on puisse arriver à les perfectionner. L'inconvénient des vases poreux est qu'ils ne peuver se prêter à des installations importantes. Ils ne conviennent que lorsqu'il n'y a pas circula tion du liquide. Si la circulation est nécessaire, on peut employer les diaphragmes tubulaires comme dans l'appareil Outhenin-Chalandre (Voir p. 58).

Parmi les autres matières premières, il faut citer :

L'amiante employée à l'état de papier, de carton ou de toile, soit seule, soit mélangée ave d'autres matières, notamment la chaux ; dans ce cas, la plaque est badigeonnée de silicate ou d phosphate de soude pour lui donner de la solidité. Le produit, improprement appelé « porcelain d'amiante », possède l'avantage d'être excessivement poreux.

Le ciment est assez employé ; on lui donne de la porosité par un gâchage spécial ou l'addi tion de sel marin ou de tout autre sel soluble, du soufre, etc. Dans le premier cas, un simple less vage à l'eau enlève le sel ; dans le second, il faut employer le sulfure de carbone. On peut éga lement mélanger de la pierre ponce, du coke, etc.

Pour donner au ciment de la solidité, on le gâche avec de l'amiante ou autre substanc minérale ou organique, laine, poils, etc.

Nous donnerons plus loin la construction d'un diaphragme Hargreaves (p. 55).

A côté des matières minérales, on a proposé également l'utilisation des matières orga niques, le papier-parchemin que l'on protège en le recouvrant d'une couche d'oxychlorure alcalino-terreux, en ajoutant au liquide anodique du chlorure de calcium ou de magnésium, à l dose de 2 0/0 ; le papier ou le carton imprégné d'albumine coagulée, ensuite de collodion, d gélatine insolubilisée, soit par le bichromate, soit par l'aldéhyde formique. On peut employe ces substances soit seules, soit mélangées avec les matières minérales précitées.

Il existe également toutes sortes de systèmes de diaphragmes en substances perforées plaques disposées en lames de persiennes, s'appliquant surtout au cas où l'on a simplement de gaz à séparer. Enfin, on peut supprimer les diaphragmes, soit par des dispositifs spéciaux, so par l'emploi de densités de courant appropriées.

Comme tout l'appareillage d'électrolyse, les diaphragmes étaient assez mal représentés l'Exposition ; deux ou trois maisons simplement exposaient des vases poreux. La Manufactur royale de Porcelaine de Berlin exposait, dans la Collectivité allemande de l'Industrie chimiqu une plaque poreuse pour électrolyse de 80 cm sur 80 cm et de moins de 2 cm d'épaisseur ; cett pièce magnifique n'est malheureusement qu'un objet d'exposition, car, dans la pratique, on es loin d'atteindre ces dimensions à des prix industriels.

## ÉLECTRODES

Classification. — Les deux électrodes d'un électrolyseur ne sont pas forcément semblables, les ions qui se dégagent à la surface de chacune d'elles n'ayant pas les mêmes affinités.

Outre la classification en anode et cathode, on peut considérer les électrodes fixes qui servent uniquement de conducteur au courant, mais dont la substance n'intervient pas dans la réaction, et les électrodes variables dans lesquelles la substance agit, soit en se dissolvant et servant de matière première (anode soluble), soit en s'accroissant, par suite du dépôt, sur la cathode, du produit fabriqué.

Les anodes solubles sont en général en métal coulé; on les emploie soit dans l'affinage des métaux, cuivre, argent, etc., les matières constituant les impuretés se déposant sous forme de boues que l'on traite ultérieurement ou restant en solution dans le bain; les anodes solubles sont également employées pour la préparation de certains produits chimiques, comme celles en ferro-chrome pour la fabrication des chromates, celles en plomb, mercure, etc., pour la préparation des sels de ces différents métaux. Nous reparlerons de ces différents types à propos de l'affinage du cuivre et du nickel.

Le dépôt sur la cahtode est généralement formé par un métal affiné. Lorsque celui-ci doit être recueilli compact, l'électrode primitive est formée d'une lame mince de métal pur. (Il n'est pas question ici, bien entendu, de la galvanoplastie et des dépôts électrochimiques, dans lesquels on a en vue la préparation des doublés.)

Si, au contraire, le métal se dépose en éponge ou en petits cristaux, comme, dans certains cas, le plomb et l'étain, la cathode peut être quelconque, pourvu qu'elle soit inattaquable. Le métal est recueilli au fur et à mesure de sa formation par un dispositif spécial permettant de gratter ou de brosser la cathode. Les cathodes rotatives sont assez indiquées dans ce cas.

A cette classe se rattachent les cathodes liquides, constituées soit par du plomb fondu, soit par du mercure. Le métal formé se dissout ou s'allie avec celui de la cathode. Le composé obtenu est traité ensuite suivant le produit que l'on désire obtenir. Nous parlerons de ces électrodes à propos de la fabrication des alcalis par voie humide et par voie de fusion ignée.

Les électrodes fixes sont utilisées dans la plupart des préparations de produits chimiques.

La principale qualité qu'une électrode fixe doit avoir, c'est d'être complètement inattaquable dans les conditions où on l'utilise.

Il est assez facile de trouver des cathodes complètement inattaquables; le fer et le nickel en milieu alcalin, le plomb en milieu sulfurique, le platine et le charbon dans presque tous les cas sont déjà inattaquables en circuit ouvert et conviennent, en général, très bien; d'ailleurs, la plupart des métaux, même en milieu très acide, sont inattaquables au pôle négatif en circuit fermé et peuvent être employés dans un grand nombre de cas.

Il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit de l'anode; aucun métal, jusqu'à présent, sauf le platine, n'a pu être employé avec succès. Encore le platine lui-même est-il attaqué dans certains cas; il a, en outre, l'inconvénient d'immobiliser un capital considérable. Le charbon est très employé; on fait actuellement des variétés qui résistent assez bien au chlore, mais sont encore assez rapidement détériorées lorsque les bains renferment des impuretés et, notamment, de petites quantités d'acide sulfurique.

On a proposé également l'emploi de plaques en magnétite ($Fe^3O^4$) ou ilménite $(FeTi)O^3$, en ferro-silicium, etc.

Électrodes en platine. — On peut employer à la place du métal pur un alliage renfermant 5 ou 10 0/0 d'iridium, légèrement plus cher, mais beaucoup plus dur et plus inattaquable. Le platine est généralement employé sous forme de lames; la toile, outre son prix de façon considérable, a l'inconvénient d'être excessivement fragile. Les lames employées ont une épaisseur de 1/10e à 1/15e de millimètre; pour leur donner de la solidité, on les monte dans des cadres inattaquables, par exemple en fer goudronné, sur lesquels on replie le bord des lames.

On a proposé de remplacer le platine par des métaux platinés électrolytiquement ou des métaux plaqués platine; mais on n'a eu jusqu'ici que de mauvais résultats; en effet, ces produits sont encore d'un prix élevé et lorsque, par suite d'usure, d'accident ou de mauvaise fabrication, une parcelle de métal sous-jacent est mise à nu, l'électrode est rapidement détériorée et le résidu n'a plus de valeur, tandis que les déchets de platine, à la façon près, ont la valeur du platine neuf.

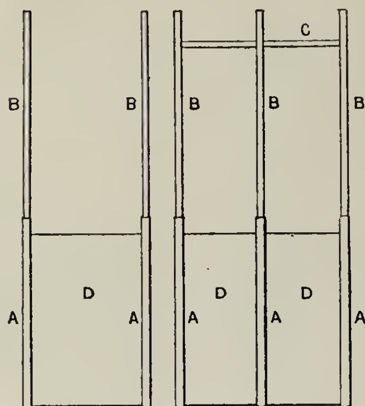


Fig. 16 et 17. — Électrodes de la maison Heraeus.

Il n'y a guère que la maison Heraeus, de Hanau, qui exposait, dans la Collectivité allemande de l'Industrie Chimique, des électrodes industrielles. Ces électrodes (*fig.* 16 et 17), dont le but était d'avoir de grandes surfaces et, par conséquent, de la solidité pour une faible dépense en platine, consistaient en montures formées d'un cadre en platine, dont deux des côtés étaient formés de tubes dans lesquels pénétraient à frottement des tiges de cuivre; les deux autres côtés du cadre étaient de simples lames de platine. Sur le cadre étaient tendues des toiles de platine appropriées. Certains modèles se composaient de feuilles de platine auxquelles étaient soudés de chaque côté des tubes de même métal, entourant une tige de cuivre, ces feuilles étant planes ou ondulées. On peut ainsi faire arriver aux électrodes un courant d'assez grande intensité avec une dépense minimum de platine, tout en donnant aux électrodes une grande solidité et en évitant l'emploi des métaux platinés sans grande solidité, comme nous l'avons fait remarquer.

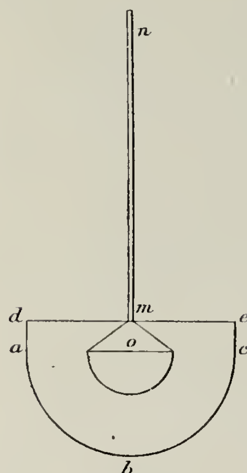


Fig. 18. — Électrodes de M. Riban.

La maison Heraeus et la maison Contenau et Godart, cette dernière dans l'annexe de l'Électrochimie, exposaient également la série des électrodes employées pour les analyses électrolytiques (modèles de Riche, de Classen, Luckow, etc.).

M. Riban faisait figurer, dans l'Exposition centennale des Produits chimiques et dans celle de la maison Chabaud, un support et des électrodes pour analyses. L'électrode où doit se faire le dépôt, anode ou cathode, est formée d'une capsule hémisphérique de platine (*fig.* 18), de 7 cm de diamètre, surmontée d'une partie cylindrique de 1 cm de hauteur. L'autre électrode est une demi-sphère de 3 cm de diamètre surmontée d'un cône de 1 cm, soudé, d'une part, à la sphère et, d'autre part, à une tige. Les électrodes sont disposées de telle sorte que les centres des deux sphères coïncident afin que la densité de courant soit constante en tous les points.

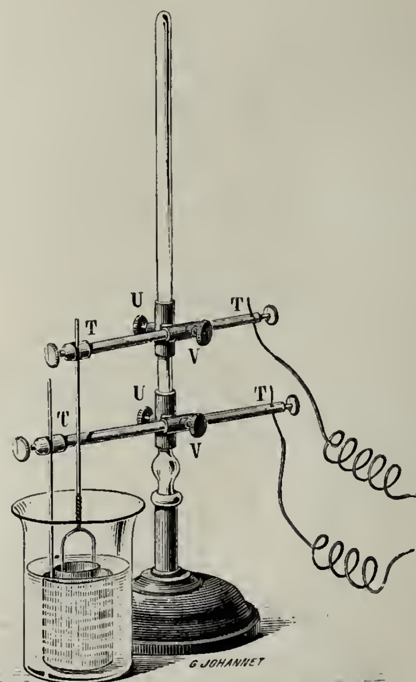


Fig. 19. — Support d'électrolyse de M. Riban.

Le support (*fig.* 19) est formé d'un seul pied à tige de verre sur lequel se meuvent des bras susceptibles de prendre les positions les plus variées. Chacun de ces bras (*fig.* 20) est constitué

par deux tubes métalliques AB et CD, croisés à angle droit, le premier tube pouvant glisser sur la tige de verre verticale et y être fixé par une vis d'arrêt U; le second est traversé par une tige de laiton TT, qui est susceptible de glisser dans le sens transversal et de tourner autour de son axe; une vis d'arrêt V peut la fixer dans une position déterminée. A l'une des extrémités de cette tige est soudée une borne P destinée à pincer le fil de suspension de l'électrode; le trou de

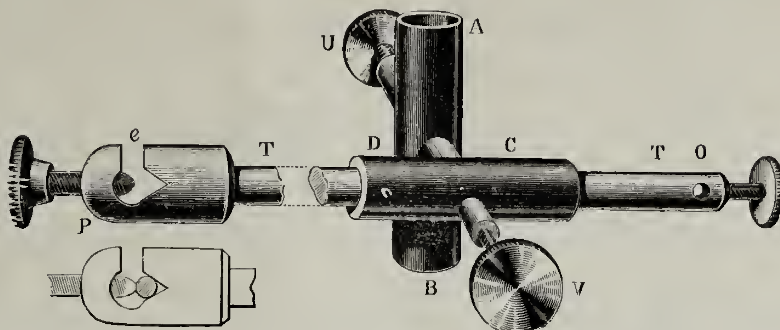



Fig. 20. — Détail du support pour électrodes de M. Riban.

cette borne porte une encoche latérale *e* permettant la sortie facile de l'électrode. Il est taillé, en outre, en forme de V, pour le bon calage du fil. L'autre extrémité est percée d'un trou O, avec vis de pression, pour recevoir le fil amenant le courant. La facilité de pouvoir faire glisser transversalement la tige et de lui communiquer aussi divers mouvements de rotation et de translation permet d'assurer la verticalité des électrodes et un bon centrage dans les bains. (Les figures 18 à 20 sont extraites de l'ouvrage de M. Riban : *Analyse électrolytique;* Masson, éditeur.)

M. Hollard exposait dans la vitrine de l'Association des Anciens Élèves de l'École de Physique et de Chimie industrielles des électrodes ainsi construites (*fig.* 21) : L'électrode destinée à recevoir l'élément que l'on veut doser est un tronc de cône renversé et presque cylindrique formé d'une feuille de platine pur, à bords réunis par soudure autogène. Les bases de ce tronc de cône sont 43 et 32 mm de diamètre, et la génératrice a 65 cm de long. Une tige de platine dur (platine iridium 90/10) est soudée à l'or sur le tronc de cône.

L'autre électrode B est constituée par une spirale en fil de platine pur, qui affecte la forme de la première électrode et qui repose sur un pied à trois branches. Ces trois branches forment les rayons d'une circonférence de 45 mm de diamètre. Sur cette circonférence, représentée par un fil de platine, vient reposer une petite cage constituée par les prolongements, de 40 mm, des trois branches et par un fil circulaire de 55 mm de diamètre, aplati dans le sens vertical, où aboutissent ces trois branches. Le fil qui sert à la construction de cette dernière électrode a 1,2 mm de diamètre; il est en platine pur.

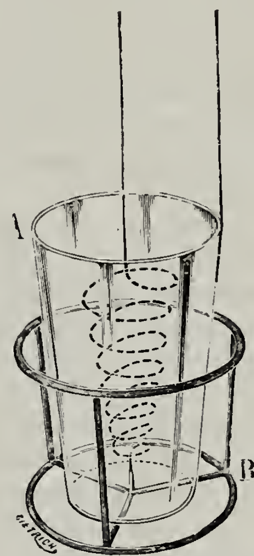



Fig. 21. — Jeu d'électrodes de M. Hollard pour l'analyse électrolytique.

Pour de très faibles dépôts (quelques milligrammes), l'auteur emploie des électrodes de dimensions plus faibles. Cet appareil présente sur les cônes, que l'auteur employait autrefois, les avantages suivants : le dépôt se fait suivant une épaisseur égale, à l'intérieur et à l'extérieur de l'électrode, au lieu de se faire surtout à l'intérieur : il en résulte une plus grande rapidité, ainsi qu'une plus grande régularité dans la formation des dépôts. D'autre part, les gaz, au lieu de se dégager presque exclusivement à l'intérieur du cône et de converger vers le sommet de ce cône, se dégagent dans toute la masse du liquide et en sortent par toute la surface. Les projections du liquide sont, par suite, beaucoup moins à craindre ; aussi peut-on augmenter considéra-

blement l'intensité du courant et diminuer ainsi la durée de l'électrolyse. Il faut remarquer, en effet, qu'avec les cônes, les gaz sortent du liquide au centre de la surface du niveau, qui est précisément la partie la moins protégée contre les projections du liquide par les plaques de verre qui recouvrent le vase.

M. Brochet faisait figurer dans la vitrine de la maison Leune (classe 87) une pince universelle pour électrolyse (*fig.* 22 et 23), dont les mâchoires, pénétrant l'une dans l'autre, permettent de serrer soit des fils, soit des tiges, soit des lames servant d'électrodes et d'y amener le courant.

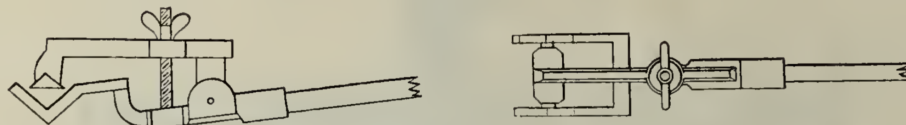


Fig. 22 et 23. — Pince universelle pour électrolyse permettant de serrer des fils, des tiges ou des lames.

Électrodes en charbon. — Pendant longtemps on a utilisé, comme charbon de piles, le coke de cornue des usines à gaz et on en a tiré, en le sciant, les pièces dont on avait besoin. Ce coke provient de la dissociation, au contact des parois surchauffées de la cornue, des carbures très riches en carbone qui se décomposent en donnant un carbure moins riche, tandis que le carbone en excès se dépose.

On obtenait de ce fait des électrodes d'un prix très élevé, surtout lorsqu'il s'agissait de pièces assez grandes qu'il fallait tirer de plaques plus grandes encore, choisies dans les morceaux provenant du décrassage et du dépiquage des cornues. On était d'ailleurs excessivement limité comme dimensions, d'autant plus que la forme cintrée des cornues et, par conséquent, du dépôt ne permet qu'une mauvaise utilisation.

Le coke de cornue a encore l'inconvénient d'être difficile à scier; on tournait la difficulté en le travaillant sur des lapidaires en fonte avec du grès comme mordant. C'est de cette façon que l'on fabriquait les charbons de piles, voire même, au début, les charbons de lampes à arc. Des échantillons de ces charbons pour lampes, ainsi obtenus, figuraient dans l'Exposition centennale d'Électricité. L'emploi des lampes à arc engagea les chercheurs dans la fabrication des charbons artificiels.

Dès le début, on employa comme matière première ce même charbon de cornue broyé à une finesse plus ou moins grande, en y ajoutant d'autres produits, tels que le noir de fumée, etc. On employait, comme agglomérant, le charbon de sucre, le glucose, etc., en malaxant le tout dans des appareils excessivement primitifs.

La matière était ensuite introduite dans une presse, permettant soit le moulage, soit le tirage à la filière. Les presses étaient relativement peu puissantes, attendu qu'à cette époque les pâtes étaient très plastiques; par contre, cette façon d'opérer présentait l'inconvénient d'exiger un étuvage rationnel très long dans un courant d'air chaud, et finalement la cuisson se faisait en plaçant les pièces obtenues dans des creusets cylindriques, en remplissant les vides avec du poussier de charbon. On employait des fours analogues à ceux employés dans la cuisson des briques en poteries.

Malgré les soins apportés pendant la dessiccation et la cuisson, les charbons se cintraient et il était presque impossible d'en avoir de droits; d'autre part, en raison de l'imperfection des procédés de mélange, ces charbons n'étaient pas homogènes.

Les lampes à arc prenant de plus en plus d'extension rendirent nécessaire l'emploi de moyens économiques et perfectionnés pour la fabrication des charbons. Les premiers efforts tendirent à la substitution du goudron au sucre et au glucose, encore employés, cependant, dans certains cas, à l'heure actuelle. L'emploi du goudron abaissa notablement le prix des charbons et contribua au développement des applications de ces charbons, aussi bien pour l'éclairage, qui constituait alors le seul débouché, que pour les industries naissantes de l'Électrochimie et de l'Électro-métallurgie.

Le gros inconvénient du goudron fut l'impossibilité de rencontrer ce produit de composition constante en raison de sa grande complexité et de la difficulté que l'on eut pour arriver à des produits homogènes, en même temps que l'industrie exigea des pièces de dimensions de plus en plus grandes, qui augmentaient les difficultés de travail et de confection de la pâte.

A côté du charbon de cornues, on emploie également comme matières premières : la houille, l'anthracite, le coke de houille, le coke de pétrole, le graphite, etc. Le coke de cornue et le graphite sont destinés à donner de la conductibilité ; l'emploi du graphite, cependant, ne saurait être recommandé dans le cas d'électrodes pour électrolyse par voie humide, ce produit étant assez facilement attaqué ; dans ce cas, on utilise à peu près exclusivement le coke de cornue ; ce dernier est assez souvent recouvert sur un des côtés de silicates provenant de l'adhérence des parois de la cornue ; il faut alors séparer cette croûte, opération qui ne peut se faire qu'à la main. Le charbon, quelle que soit sa nature, est broyé dans des appareils à mâchoires, pulvérisé sous des meules et finalement tamisé. La poudre homogène ainsi obtenue renferme du fer métallique provenant des appareils de broyage ; si ce fer doit gêner, on le sépare en enlevant les parcelles au moyen d'un séparateur magnétique. Quelquefois également, on ajoute au charbon des agglomérants, tel l'acide borique ; cela est toujours très mauvais lorsqu'il s'agit d'électrodes. D'ailleurs, les matières employées doivent être aussi pures que possible, principalement dans le cas où l'électrode participe à la réaction, comme dans les fours électrothermiques ou électrolytiques pour la préparation de l'aluminium, par exemple, les impuretés se retrouvant dans le produit fabriqué.

La poudre ainsi obtenue est malaxée avec l'agglomérant ; on doit chercher à employer celui-ci en quantité aussi faible que possible ; en effet, si la pâte est trop mouillée, elle n'est pas homogène. A la dessiccation, les pâtes trop mouillées, surtout dans le cas de pièces de dimensions assez grandes, se fendaient en raison de la dessiccation plus rapide sur les bords que dans le centre et de l'inégal retrait qui en résultait. La même fait se passait à la cuisson, qui avait pour résultat la formation de fissures et la dislocation de la masse, la cuisson se faisant à la périphérie avant de se faire au centre ; la pâte contenant des proportions relativement élevées de matières volatiles, dont la distillation ne peut se faire à travers l'enveloppe durcie sur une épaisseur plus ou moins grande, la dislocation se trouve encore facilitée.

Il a donc fallu mettre en jeu un outillage perfectionné pour avoir un mélange tout à fait intime et pour obtenir une pâte qui fût plastique avant d'être soumise à la compression. On a dû, en outre, mettre en œuvre des pressions telles que le charbon pût être travaillé avec le minimum de plasticité, correspondant précisément au minimum d'agglomérant.

Pour arriver à un mélange intime, on emploie des malaxeurs à hélices, desquels le mélange sort à l'état grenu non plastique et encore inutilisable.

La plasticité de la pâte s'obtient en la malaxant au moyen de meules d'un poids plus ou moins grand, analogues à celles employées dans la fabrication du papier.

Le mélange introduit dans ces meules est d'abord malaxé, puis laminé et forme alors de véritables tourteaux déjà plastiques ; ces tourteaux, de dimensions variables, ne peuvent passer directement à la presse, car ils emprisonneraient de l'air en quantité considérable et ne permettraient pas l'obtention d'un bon produit, les électrodes étant sujettes à la rupture.

Les tourteaux sont jetés dans un mortier dont le diamètre est environ celui du corps de la presse ; le mortier peut se séparer en deux parties pour le démoulage. La matière y est soumise à l'action d'un pilon dont le poids peut atteindre 500 kg et la hauteur de chute 1 m. Le mouvement est donné au moyen d'une came.

Sous l'influence d'un battage répété, les tourteaux se soudent, l'air est chassé et l'on obtient ainsi, après démoulage, une cartouche homogène cylindrique excessivement dure du poids de 150 à 200 kg.

La cartouche est introduite dans la presse ; elle reçoit la pression d'un piston hydraulique et l'électrode sort par une filière de section appropriée.

La pression peut atteindre 600 kg : cm². L'opération a lieu à chaud; dans ce but, on fait circuler un courant de vapeur dans la double enveloppe du cylindre fretté constituant le corps de la presse. On arrive par ce procédé à faire des électrodes de 15 cm de côté.

La Société des Carbures Métalliques et la Société « le Carbone » installaient pendant l'Exposition, dans leur usine de Notre-Dame de Briançon, un dispositif analogue permettant de faire des électrodes de 30 cm de côté. Le pilonnage se fait non dans un mortier spécial, mais dans la batterie même de la presse que l'on redresse. Les tourteaux sont soumis à une pression de 200 kg : cm² au moyen d'un piston hydraulique d'une tonne. On introduit par portions jusqu'à une tonne de produit. La batterie est ensuite rabattue devant la tête du piston de la presse hydraulique qui force la masse à passer à travers la filière. La pression est de 2 000 kg : cm² et la puissance totale de la presse de 2 000 tonnes.

Les pièces préparées avec des sirops comme agglomérant devaient être, comme nous l'avons dit, préalablement séchées dans un courant d'air de plus en plus chaud. Cette opération n'est plus nécessaire avec l'emploi du goudron.

Les pièces crues, charbons à lumière, électrodes, sont placées dans des creusets en terre réfractaire ; on garnit les vides de poussier de charbon ou de résidu d'opérations précédentes. Ces creusets, qui ont de 30 à 40 cm de diamètre et 60 à 70 cm de hauteur, sont empilés dans des fours chauffés soit à feu direct, soit au moyen de gazogènes. Le chauffage doit être progressif, surtout lorsqu'il s'agit de grandes pièces. L'électrode cuite ne doit plus être poreuse, de sorte que, si la cuisson est trop rapide, la partie externe une fois cuite ne laisse plus passer les gaz provenant de la décomposition du goudron placé au centre et amène quelquefois la rupture de l'électrode.

Les usines fabriquant leurs électrodes de four électrique emploient en général le dispositif suivant. Chaque électrode, ou une série de quatre électrodes, est placée dans une chambre en briques réfractaires à doubles parois entre lesquelles circulent les gaz. Le chauffage se fait soit à feu direct, soit par un gazogène. La chambre est chargée par la partie supérieure au moyen d'un pont roulant, les vides sont remplis de poussier de charbon et l'ouverture est fermée au moyen d'une plaque de terre réfractaire. Un carneau spécial permet l'élimination des gaz. Le chauffage doit être progressif et durer plusieurs jours ; la température atteint 1 600° environ.

Dans les usines importantes, on emploie des fours genre Hofmann chauffés par des gazogènes.

A l'usine de Notre-Dame de Briançon, le four comporte 32 chambres que l'on peut mettre en relation soit avec la cheminée, soit avec le gazogène, soit avec les chambres voisines. Les électrodes sont placées dans de grandes casettes en terre réfractaire et la charge des chambres se fait par une ouverture placée à la partie supérieure au moyen d'un pont roulant.

Les pièces récemment enfournées sont chauffées progressivement au moyen des produits de la combustion. L'air froid destiné à la combustion est envoyé, au contraire, au moyen d'un ventilateur électrique, dans la chambre la plus anciennement chargée : cet air s'échauffe peu à peu et, après avoir traversé à peu près la moitié des chambres, arrive dans celle où doit se faire la combustion des gaz provenant du gazogène. Les produits de la combustion circulent ensuite dans les autres chambres et cèdent leur chaleur aux électrodes non cuites.

Les électrodes restent de 12 à 15 jours dans le four. La production journalière correspond donc au contenu de deux ou trois chambres.

Les électrodes sont d'autant meilleures qu'elles ont été portées à une température plus élevée, aussi a-t-on pensé utiliser la haute température du four électrique pour parfaire la cuisson.

Deux procédés sont employés ; dans le procédé Castner, l'électrode est employée comme conducteur, elle est portée au rouge blanc et, pour éviter sa combustion au contact de l'air, elle est noyée dans du poussier de charbon non conducteur. Elle perd de cette façon 5 0/0 de son poids et devient beaucoup plus conductrice. Voir également le procédé Acheson dans le fascicule *Electrothermie* (p. 53).

L'autre procédé est celui de Girard et Street, dont nous avons parlé dans le fascicule *Electrothermie* (p. 52).

Produits exposés :

La Société « le Carbone » exposait différents types d'électrodes et charbons de pile.

La Société des Carbures Métalliques exposait des électrodes de four électrique et notamment de grandes électrodes de 30 cm de côté, obtenues par la soudure de quatre électrodes de 20 $\times$ 10 et, au centre, une de 10 cm de côté. Ces pièces sont collées au goudron préalablement à la cuisson.

La Compagnie Électrométallurgique des procédés Gin et Leleux exposait des électrodes de la maison Lessing, de Nuremberg.

La Société Siemens et Halske exposait des électrodes cylindriques creuses pour four électrique continu (Voir fascicule *Electrothermie*, p. 49) et des électrodes ordinaires.

Enfin, la maison Janin et Guérineau faisait figurer dans le groupe des Mines et de la Métallurgie un four à cuire les électrodes du modèle de MM. Gin et Leleux, du type que nous avons décrit plus haut.

---

# I

# ÉLECTROCHIMIE

## A. — *ÉLECTROLYSE DE SOLUTIONS EN VUE DE PRÉPARER DES MÉTALLOIDES*

On ne fait pas, en général, d'électrolyse dans le but direct d'avoir des métalloïdes ; ces corps sont plutôt des résidus d'opération, car, la plupart du temps, ils n'ont pas assez de valeur par eux-mêmes. Ce sera, par exemple, le cas de l'hydrogène, qui s'obtient dans presque toutes les industries électrolytiques, mais que l'on ne recueille pas, en général, car il est très impur ; du chlore, qui provient de la préparation des alcalis ; du soufre, etc. ; parmi les métalloïdes faits spécialement, on ne signale guère que l'oxygène et l'hydrogène provenant de l'électrolyse de l'eau, le fluor et le brome.

### HYDROGÈNE ET OXYGÈNE

Comme nous l'indiquons, l'hydrogène est obtenu dans presque toutes les opérations électrolytiques ; comme nous le verrons, l'industrie des chlorates en fournit des quantités considérables ; mais, jusqu'à présent, on ne paraît en avoir fait aucun cas, parce qu'il renferme le plus souvent une assez forte proportion d'oxygène ; il y a là évidemment une perte considérable, car cet hydrogène, recueilli, pourrait servir tout au moins comme combustible, ce qui serait assez précieux dans les pays de chutes d'eau, où généralement le charbon bon marché fait défaut. Il est bon d'ajouter que, dans le cas du chlorate, il n'y a besoin d'aucun chauffage extérieur ; la récupération de ce gaz serait surtout intéressante dans des industries telles que celles des alcalis, où l'on a des évaporations à faire, ou d'autres industries nécessitant des opérations préalables et l'emploi de fours.

Il est peu probable que l'hydrogène pur puisse être employé directement, la température de sa flamme étant trop élevée ; mais on pourrait l'utiliser avec avantage comme complément d'autres gaz : gaz pauvre, gaz à l'eau. Dans ces conditions, on pourrait même l'employer à la production de force motrice, ce qui permettrait ainsi de récupérer une partie considérable de l'énergie employée.

L'hydrogène et l'oxygène sont produits par l'électrolyse de l'eau ; pendant longtemps cette opération est restée confinée au laboratoire, par suite de la nécessité de l'emploi du platine, du fait de l'attaque par l'acide sulfurique de tous les autres métaux utilisés comme anode ; de plus, l'opération n'est pas rigoureuse, et l'emploi de voltamètres dans ces conditions, surtout pour des mesures précises, donnerait des résultats entachés d'erreur ; en effet, au pôle positif, il y a formation d'ozone qui se dégage avec l'oxygène, d'acide persulfurique et d'eau oxygénée qui restent dans l'électrolyte ; il y a donc de ce fait une certaine perte d'oxygène ; il y a également une perte d'hydrogène du fait de la réduction des composés oxygénés précités restant dans l'électrolyte. On a donc une perte de chacun des gaz ; mais cette perte est faible et insignifiante ; la présence d'ozone dans l'oxygène est plus gênante. On a essayé de remplacer le platine par le plomb ; mais les résultats n'ont pas été satisfaisants. L'opération n'a pu devenir industrielle

que lorsque l'on a substitué les alcalis à l'acide sulfurique. Dans ce cas, les gaz obtenus sont purs, et le gros avantage est que l'on peut employer des électrodes en fer ou nickel.

Un voltamètre de laboratoire à gaz tonnant, construit sur ce principe, figurait dans la vitrine de l'Association des Anciens Élèves de l'École de Physique et de Chimie industrielles de Paris. Il est employé dans le laboratoire d'électrochimie de cette École pour l'étude des réactions d'après la méthode d'Œttel.

Cet appareil (*fig.* 24) se compose d'un récipient en nickel A, de 8,5 cm de diamètre et 28 cm de hauteur, servant de cathode, fermé par un disque en ébonite B, au moyen d'une borne *a*, de trois écrous à oreilles *b*, et d'un anneau de caoutchouc. Un cylindre percé de trous D est fixé également au couvercle au moyen d'une borne *a'* et de trois écrous à oreilles *b'*. La borne *a* et les écrous *b* sont reliés électriquement au moyen d'un anneau plat E, qui sert à assurer le serrage; de même pour la borne *a'* et les écrons *b'*, qui sont réunis par l'anneau plat F.

Le dégagement gazeux s'effectue par un tube G muni d'une boule H servant d'émousseur. Ce tube est mastiqué dans une pièce I, vissée dans le couvercle en ébonite. Pour l'usage, le récipient est rempli d'une solution de soude caustique pure à 20 0/0. L'appareil peut être employé jusqu'à 50 ampères; mais, à forte intensité, l'échauffement est assez considérable; dans ces conditions, l'appareil peut être placé dans un récipient d'eau courante.

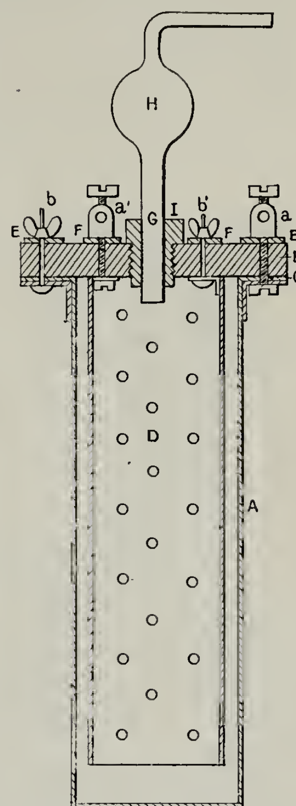


Fig. 24. — Voltamètre à gaz tonnant.

La maison Garuti, de Pompili, construit actuellement un appareil pour l'électrolyse indiqué sur le *Catalogue officiel*, mais que nous n'avons pu découvrir.

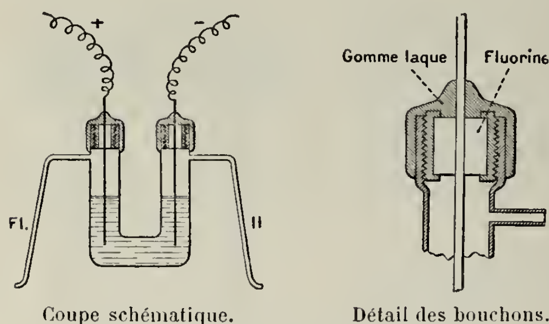
Le principe de cet appareil est assez curieux; les anodes et cathodes disposées parallèlement sont en fer, de même que les diaphragmes; ceux-ci sont percés d'une infinité de petits trous que les gaz ne peuvent traverser en vertu de la tension capillaire, lorsque les diaphragmes plongent dans le liquide; en outre, les diaphragmes métalliques n'agissent pas comme électrodes bipolaires, la tension aux bornes étant inférieure au double de la force électromotrice de décomposition de l'eau ; le métal se comporte dans ces conditions comme un corps inerte. Ces appareils sont employés dans un certain nombre d'usines italiennes et notamment au parc aérostatique militaire de Tivoli, près de Rome.

L'Exposition collective allemande de l'Industrie chimique renfermait de l'hydrogène et de l'oxygène comprimés; les maisons qui fabriquent ces produits sont : Chemische Fabrik Griesheim-Elektron, qui recueille l'hydrogène provenant de son procédé de fabrication des alcalis électrolytiques, et la Sauerstoff-Fabrik (fabrique d'oxygène), qui exploite en Allemagne le procédé des frères Brin, par l'oxyde de baryum, et fabrique, depuis peu, l'oxygène et l'hydrogène électrolytiques; pour éviter dans les récipients le mélange de deux gaz, par suite d'une fausse manœuvre, on utilise une disposition des appareils qui consiste à munir les appareils pour l'oxygène d'un pas de vis allant de droite à gauche et ceux pour l'hydrogène d'un pas de vis allant de gauche à droite.

## FLUOR

Appareils de M. Moissan. — Le fluor a été isolé, en 1886, par M. Moissan en électrolysant une solution de fluorhydrate de fluorure de potassium dans l'acide fluorhydrique anhydre. Ses premiers essais, à peu près infructueux, avaient porté sur le trifluorure d'arsenic.

*Petit appareil en platine.* — Il se compose d'un tube en U en platine (*fig.* 25), dont le diamètre est de 1,50 cm et la hauteur 9,50 cm. Les deux extrémités (*fig.* 26) sont fermées par des bouchons à vis formés d'un cylindre de fluorine serti avec soin dans un cylindre creux en platine, portant un pas de vis extérieur. Dans l'axe de chaque bouchon se trouve une tige carrée de 2 mm de côté et de 10 cm de longueur, s'arrêtant à 2 mm du fond. Cette tige est en platine-iridium à 10 0/0 d'iridium, alliage moins attaquable que le platine pur. Deux tubes abducteurs en platine, soudés à chaque branche du tube en U, un peu au-dessous des bouchons et au-dessus, par conséquent, du niveau du liquide, permettent aux gaz libérés par l'action du courant de se dégager au dehors. Pour assurer l'étanchéité des joints et éviter les fuites par les pas de vis, les bouchons et la partie supérieure des branches du tube sont enduits de gomme laque. Cet appareil est maintenu, au moyen d'un bouchon de liège, dans un vase cylindrique en verre rempli de chlorure de méthyle. Deux tubes permettent : l'un, l'arrivée d'un courant d'air sec ; l'autre, l'aspiration plus ou moins rapide déterminée par une trompe. Lorsque le tube amenant l'air sec plonge dans le chlorure de méthyle, il est facile, en activant l'évaporation, d'obtenir un froid de — 50° ; lorsque, au contraire, ce tube ne fait qu'affleurer le liquide et que le courant d'air est modéré, on maintient la température vers — 23°.



Coupe schématique. Détail des bouchons.

Fig. 25 et 26. — Appareil de M. Moissan pour la fabrication du fluor.

L'acide fluorhydrique anhydre, comme tous les hydracides, n'est pas un électrolyte ; on ne peut donc l'utiliser. Il faut employer une solution de fluorure de potassium ou plutôt de fluorhydrate de fluorure de potassium dans ce même acide. La préparation de ce produit ainsi que celle de l'acide fluorhydrique anhydre doivent être faites avec soin. A cet effet, on ajoute à l'acide du commerce une certaine quantité de potasse à l'alcool et l'on distille pour avoir un produit exempt de composés du silicium. L'acide obtenu est divisé en deux parties dont une est saturée de carbonate de potassium pur ; on mélange les deux solutions et on évapore à sec pour obtenir le fluorhydrate de fluorure de potassium. Ce produit est complètement desséché en l'abandonnant dans le vide sec pendant quinze jours.

Pour avoir de l'acide fluorhydrique pur et sec, on distille ce fluorhydrate de fluorure dans une cornue en platine en perdant les premières portions contenant l'eau qui a pu être absorbée au cours des manipulations. Cet acide fluorhydrique est un liquide bouillant à 19°,5, que l'on doit conserver dans une bouteille de platine.

Pour faire l'électrolyse, on introduit dans le tube en U 6 à 7 gr de fluorhydrate de fluorure et 15 à 16 gr d'acide fluorhydrique. Avec une intensité de 3 à 4 ampères, on peut produire de 1,5 à 2 litres de gaz à l'heure. Si la quantité de fluorure de potassium est trop faible, on perçoit le bruit de petites détonations provenant de ce que la paroi du tube de platine sert de conducteur intermédiaire et agit comme électrode bipolaire, de sorte que l'on obtient dans chaque compartiment du tube un mélange de fluor et d'hydrogène qui se combinent, d'où les détonations ; le rendement est donc excessivement faible dans ce cas ; si, au contraire, l'électrolyte renferme une certaine quantité de sel de potassium, lorsque l'on refroidit la solution pour faire l'électrolyse, une partie du sel se dépose sur les parois ; cette couche isolante empêche donc le tube d'agir comme électrode, en même temps qu'elle le protège contre l'attaque qui se fait toujours un peu sentir. En tout cas, si une légère dérivation se produit par le tube, cela n'empêche pas les gaz obtenus d'être purs : en effet, si l'un des deux gaz est produit accidentellement dans le compartiment où il ne devrait pas exister, il se combine immédiatement avec le gaz s'y trouvant normalement et en grand excès ; il y a simplement une perte de produit. Le seul cas où le fluor peut être impur se réalise lorsque les produits employés sont, en dépit des

précautions prises, légèrement humides; les premières portions en fluor renferment alors un peu d'oxygène.

*Grand appareil en platine.* — Cet appareil (*fig.* 27) a une capacité de 160 cm³ environ et permet de recevoir environ 100 gr d'acide fluorhydrique. La disposition générale est la même que celle de l'appareil petit modèle ; mais, pour assurer l'étanchéité, la partie supérieure de chaque branche du tube en U et la gaine filetée en platine du bouchon correspondant sont munies d'écrous en laiton entre lesquels on écrase une rondelle de plomb. Pour donner de la consistance aux électrodes, elles affectent la forme de massue. Les tubes de dégagement des gaz sont munis d'écrous permettant d'ajuster les appareils accessoires ou de fermer l'appareil ; on peut ainsi conserver l'électrolyte sans qu'il soit nécessaire de le transvaser dans un autre récipient.

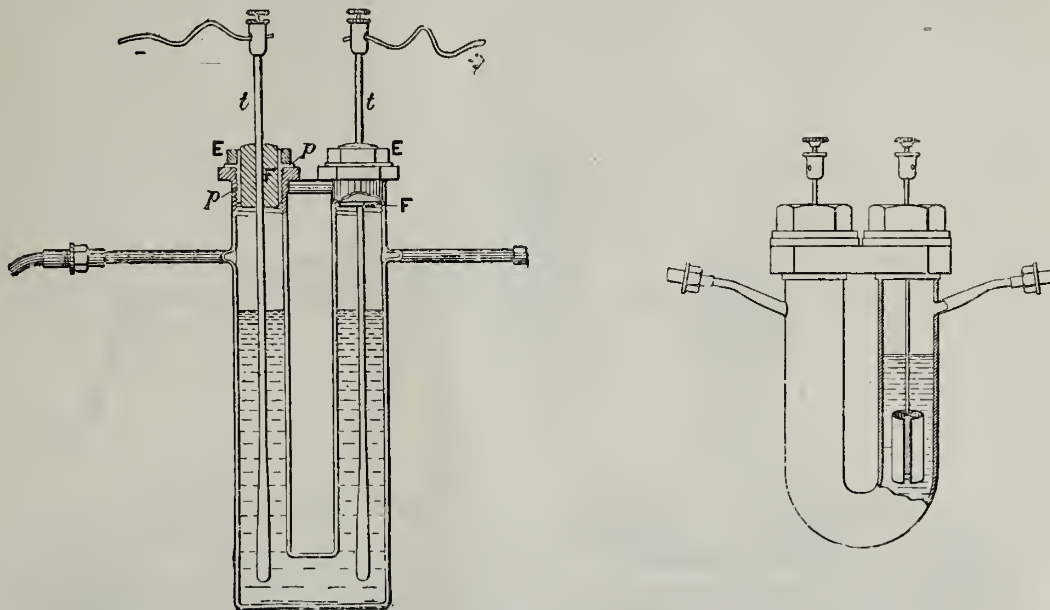



Fig. 27 et 28. — Grands appareils de M. Moissan pour la fabrication du fluor.

Pour débarrasser le fluor de l'acide fluorhydrique entraîné (*fig.* 29), le gaz passe dans un petit serpentin en platine placé dans un mélange réfrigérant ou mieux dans du chlorure de méthyle. A la suite se trouvent deux tubes renfermant du fluorure de sodium fondu, qui retient les dernières traces d'acide fluorhydrique et possède sur le sel de potassium l'avantage de ne pas être déliquescent. Les différentes pièces de l'appareil sont réunies au moyen de vis et d'écrous entre lesquels on écrase des rondelles de plomb.

Cet appareil a fonctionné un certain nombre de fois à l'annexe de la classe 24.

*Appareil en cuivre.* — Les appareils en platine présentent le gros inconvénient de coûter excessivement cher, même quand ils sont de petites dimensions ; leur prix devient inabordable lorsque l'on désire un débit un peu considérable. M. Moissan est arrivé à faire ses essais les plus récents dans un appareil en cuivre.

Cet appareil (*fig.* 28) est construit exactement sur le même modèle que le précédent ; mais il est de dimension plus grande ; son volume est de 300 cm³ et il permet d'employer une solution de 200 cm³ d'acide fluorhydrique et 50 gr de fluorhydrate de fluorure de potassium. Les électrodes en forme de massue sont remplacées par de petits cylindres de platine ouverts suivant une génératrice.

Le chlorure de méthyle peut être avantageusement remplacé par de l'acétone tenant en suspension de la neige carbonique, ce qui permet de descendre à — 80°. Dans ces conditions, on doit baisser la teneur en sel de potassium pour éviter la prise en masse du produit.

Avec un courant de 50 volts et 15 ampères, on peut obtenir environ 5 litres de gaz à l'heure ; avec 20 ampères, 8 litres. Cependant, dans ces conditions, l'opération ne peut durer longtemps ; car, en dépit du mélange réfrigérant, le liquide s'échauffe et le gaz entraîne en abondance de l'acide fluorhydrique.

Dès le début de l'électrolyse, le cuivre se recouvre de fluorure cuivreux complètement insoluble dans l'acide fluorhydrique absolument anhydre et tout à fait isolant. C'est à ces particularités que l'on doit de pouvoir utiliser ce métal dans la construction de l'appareil.

A côté de ces appareils, M. Moissan exposait tout le matériel qui lui a servi pour la préparation du fluor et, notamment, le tube de 1 m de longueur, fermé à ses extrémités par des plans de fluorine incolore et polie et muni de deux tubes abducteurs, qui lui a servi pour comparer la couleur du fluor et celle du chlore.

(Les figures 25 à 29 sont extraites de l'ouvrage de M. Moissan : *le Fluor ;* Steinheil, éditeur.)

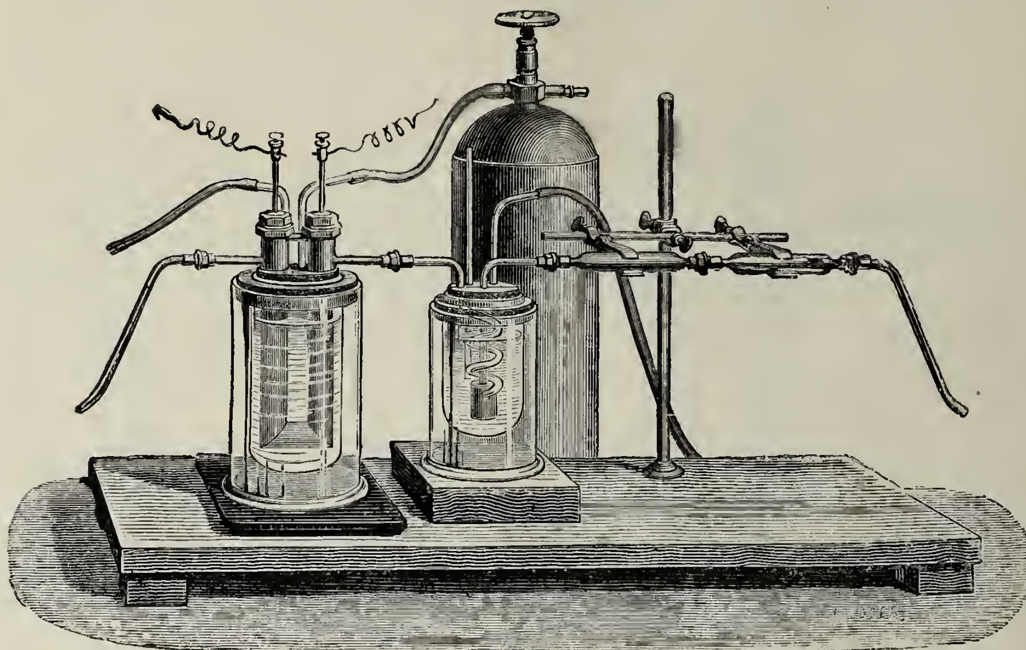


Fig. 29. — Installation pour la préparation du fluor.

MM. Contenau et Godart exposaient également, dans l'annexe de la classe 24, tout un matériel pour la fabrication du fluor d'après les données de M. Moissan, dont ils ont construit les appareils.

Appareils de MM. Camille Poulenc et Maurice Meslans. — Les appareils employés par M. Moissan pour la préparation du fluor sont d'un très mauvais rendement par leur nature même. Le tube en U présentant une résistance considérable, MM. Poulenc et Meslans ont pensé qu'il serait intéressant d'avoir des appareils à grande production et rendement élevé, dans lesquels naturellement le platine devra être réduit au minimum.

Pour réaliser un appareil pratique, ils se sont surtout attachés à résoudre les trois points essentiels suivants :

1° Suppression des isolants en fluorine et, d'une façon générale, de tout joint dans la cellule anodique où le fluor se forme ;

2° Constitution d'un diaphragme inactif au point de vue électrolytique entre les cellules anodiques et cathodiques et qui, tout en étant aussi peu résistant que possible, permette une séparation complète des deux gaz fluor et hydrogène ;

3° Réalisation de dispositifs permettant d'accroître la surface utile des électrodes et de réduire au minimum la couche d'électrolyte interposée entre elles, de façon à diminuer la résis-

tance de l'appareil, d'où augmentation du rendement en énergie et diminution de l'échauffement du bain.

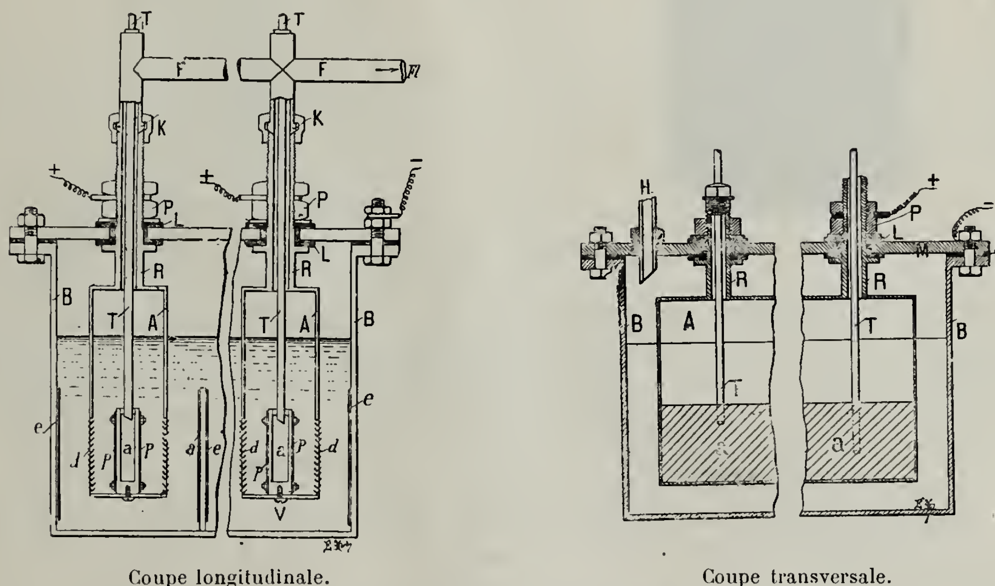
Ces conditions ont été réalisées en employant comme diaphragme une boîte en cuivre percée d'ouvertures en forme de V permettant le libre contact entre les liquides anodique et cathodique, mais suffisantes pour canaliser les gaz et éviter leur mélange. Ce dispositif rentre dans la classe des diaphragmes dits « à lame de persiennes ». Un tube de cuivre, servant au départ du fluor, est brasé à la partie supérieure de la boîte. Celle-ci renferme les anodes, elle est placée dans une autre boîte en cuivre servant de cathode, de façon que toutes les ouvertures soient au-dessous du niveau du liquide contenu dans cette seconde boîte.

Les cellules anodiques sont isolées de la cuve cathodique par un joint en caoutchouc qui assure l'étanchéité de l'appareil, lequel joint se trouve en contact avec l'acide fluorhydrique, mais non avec le fluor.

Dès que le courant passe, la caisse anodique entière agit comme anode; le fluor qui se dégage attaque le cuivre et le recouvre d'une mince couche isolante de fluorure de cuivre, de sorte que seules les anodes de platine continuent à agir d'une façon active. Toute la partie en cuivre de l'appareil qui communique avec le pôle positif de la source d'énergie se comporte désormais comme une substance inerte, et c'est là surtout le point original et intéressant de l'appareil de MM. Poulenc et Meslans.

Deux types ont déjà été établis et figuraient à l'Exposition, dans l'annexe de la classe 24, un type industriel et un de laboratoire. Ce dernier y a fonctionné un certain nombre de fois.

*Appareil industriel.* — Les figures 30 et 31 représentent des coupes de l'appareil suivant deux plans perpendiculaires.




Coupe longitudinale. Coupe transversale.

Fig. 30 et 31. — Appareil pour la fabrication du fluor de MM. C. Poulenc et M. Meslans.

B est une cuve rectangulaire en cuivre qui renferme l'électrolyte (solution de fluorure de potassium dans l'acide fluorhydrique anhydre). Un couvercle également en cuivre est fixé sur cette cuve à l'aide de boulons ; un joint en caoutchouc assure l'étanchéité.

L'ensemble est relié au pôle positif du générateur d'électricité; des lames de cuivre *e* sont fixées aux parois de la cuve et fonctionnent comme cathodes entre les diverses cellules anodiques. Cette cuve est refroidie extérieurement par un mélange réfrigérant.

A est une boîte rectangulaire en cuivre, de forme allongée et plate, fermée à la partie inférieure et munie à la partie supérieure de tubes R servant de support à cette boîte et de dégage-

ment au fluor. Ces tubes sont isolés du couvercle à l'aide d'un joint de caoutchouc L qui assure l'étanchéité.

Les anodes *a*, *a* sont constituées par des boîtes plates en cuivre sur lesquelles sont boulonnées des plaques de platine et à l'intérieur desquelles circule un mélange réfrigérant amené par les tubes T,T placés à l'intérieur des tubes R,R.

Le fluor dégagé dans les diverses cellules anodiques se dirige par un tube commun F dans un réfrigérant ascendant, où il se dépouille de l'acide fluorhydrique entraîné qui retombe dans l'appareil.

De même, l'hydrogène qui se dégage des compartiments cathodiques abandonne par refroidissement les vapeurs acides qu'il a entraînées.

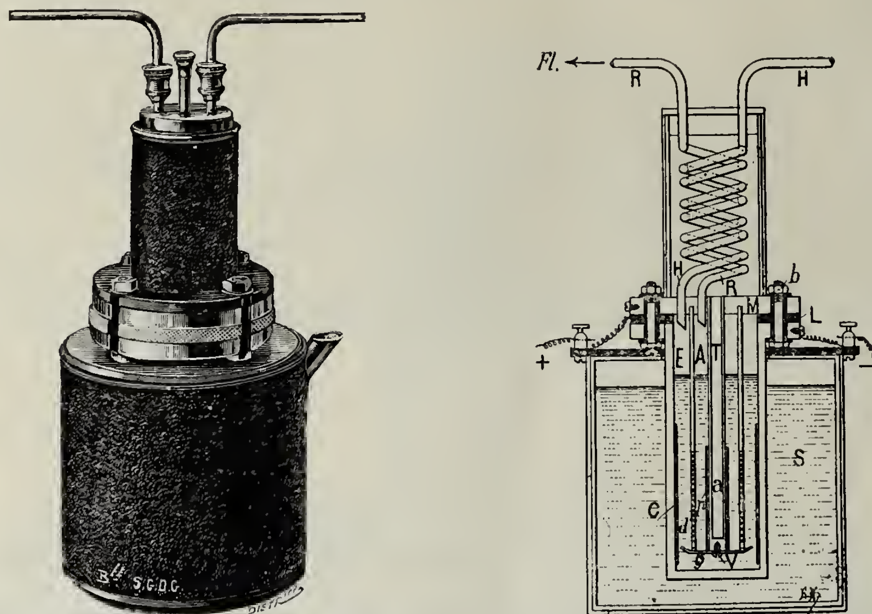



Fig. 32 et 33. — Appareil de laboratoire de MM. C. Poulenc et Meslans pour la fabrication du fluor.

Les parois des boîtes A, A sont ajourées dans la partie inférieure située en face des anodes; des lames de cuivre mince *d*, *d*, pliées en V et fixées les unes au-dessus des autres à une distance convenable, constituent le diaphragme. Ainsi que nous l'avons vu, diaphragme et anode sont reliés au pôle positif, et toute la partie cuivre se recouvre instantanément de fluorure de cuivre.

Grâce à l'ensemble de ces dispositions :

1° Le fluor, jusqu'à sa sortie de l'appareil, n'ayant de contact qu'avec des parois métalliques, il n'y a pas besoin de joints en fluorine; le caoutchouc suffit pour l'hydrogène chargé d'acide fluorhydrique ;

2° L'étendue des électrodes est illimitée et leur rapprochement peut être réduit à quelques centimètres ;

3° La faible résistance de la couche d'électrolyte entre les électrodes permet d'obtenir un très bon rendement en énergie ;

4° Le refroidissement de l'anode diminue l'attaque d'une façon appréciable et permet de refroidir moins énergiquement la masse de l'électrolyte, ce qui a une heureuse influence sur le régime de l'électrolyse.

Ajoutons que la fabrication de l'acide fluorhydrique anhydre n'est pas un obstacle à la préparation industrielle du fluor. Il est obtenu par la distillation du fluorhydrate de fluorure de potassium fondu dans un alambic en cuivre, lequel n'est pas attaqué du tout.

*Appareil de laboratoire.* — Il est représenté sur la figure 32 et en coupe verticale sur la figure 33 et est basé sur le même principe que le précédent; il ne renferme que 150 $cm^3$ d'électrolyte.

E est un vase cylindrique en cuivre qui contient l'électrolyte et dont la paroi sert de cathode.

M est le couvercle en cuivre isolé du vase E par une rondelle de caoutchouc L qui sert de joint. Ce couvercle est maintenu par les boulons *b* isolés.

Sur ce couvercle sont brasés :

1° Le tube A, qui est ajouré dans le bas en *d*;

2° Le tube T, qui vient s'ouvrir dans la boîte qui reçoit un liquide réfrigérant. Ce tube T, fermé à la partie inférieure, reçoit un manchon de platine *p* et la plaque de cuivre *g* fixée au moyen de la vis de cuivre V;

3° Deux tubes serpentins, dont l'un R sert au dégagement du fluor et l'autre H, à celui de l'hydrogène; ils fonctionnent comme réfrigérants à reflux pour la condensation des vapeurs d'acide fluorhydrique entraînées.

L'ensemble est relié au pôle positif de la source d'électricité.

Le vase cathodique est placé lui-même dans un mélange réfrigérant.

Le fonctionnement de l'appareil est identique au précédent; aussitôt que le courant passe, le tube diaphragme A*d* se recouvre de fluorure de cuivre et seules l'anode de platine *p* refroidie à l'intérieur et la paroi de cuivre refroidie à l'extérieur concourent à la décomposition de l'électrolyte.

## CHLORE

Le chlore est obtenu dans l'électrolyse des chlorures. On a proposé de le retirer de l'acide chlorhydrique, mais cette opération est superflue : en effet, l'industrie des alcalis électrolytiques donnera, le jour où elle sera employée sur une grande échelle, une quantité considérable de chlore qui sera excessivement gênante et beaucoup plus encombrante que l'acide chlorhydrique du procédé Leblanc. Aussi cherche-t-on déjà l'utilisation de ce chlore.

La Collectivité allemande de l'Industrie chimique exoosait du chlore liquide. Ce produit n'est d'ailleurs pas une nouveauté; la maison Péchiney et C[ie] le fournissait (non produit par électrolyse) il y a plus de dix ans ; mais les Compagnies de chemins de fer français ont absolument refusé de le transporter et la fabrication a dû être arrêtée. La condition principale pour que les récipients en acier ne soient pas attaqués par le liquide est que celui-ci soit rigoureusement sec.

La Volta Suisse monte actuellement la liquéfaction du chlore électrolytique.

Nous reviendrons d'ailleurs sur l'industrie du chlore au chapitre suivant.

## BROME

Ce produit est fabriqué en Allemagne par la « Consolidirte Alkaliwerke » de Westeregeln (Allemagne), qui fait partie du Syndicat des mines de Stassfurth, dont les produits figuraient dans l'Exposition collective allemande de l'industrie chimique.

On n'a aucune indication sur cette industrie, d'ailleurs très spéciale.

## CARBONE

Nous avons vu, au chapitre de l'*Electrothermie*, la reproduction du diamant et de différents graphites par M. Moissan, la fabrication du noir d'acétylène de M. Hubou, du graphite de M. Acheson et des charbons électrographitiques de MM. Girard et Street.

## B. — *ÉLECTROLYSE DES CHLORURES ALCALINS*

### CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

L'électrolyse des chlorures alcalins constitue le chapitre le plus intéressant de l'Électrochimie, et par l'importance des produits industriels que l'on peut préparer, et par la variété des méthodes que l'on peut employer. Tous les modes d'opération de la voie sèche et de la voie humide y sont représentés.

On peut classer de la façon suivante l'ensemble des opérations que l'on peut effectuer :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Electrolyse par voie humide. | Sans diaphragme. | Cathode solide. | A chaud... | Chlorates de potassium et sodium. |
| | | | A froid.... | Hypochlorites (Liqueurs de blanchiment et de désinfection). Perchlorates. |
| | | Cathode liquide.......... | | Alcalis et Chlore. |
| | Avec diaphragme. | Utilisation directe des produits.................... | | Alcalis et Chlore. |
| | | Utilisation indirecte des produits............... | | Chlorates, Hypochlorites. |
| Electrolyse par fusion ignée. | Avec cathode solide : Métaux : Sodium, Lithium, etc. | | | |
| | Avec cathode liquide : Alliages, Alcalis et Chlore. | | | |

La plupart de ces modes opératoires ont donné lieu à des essais industriels plus ou moins couronnés de succès ; passons-les rapidement en revue. Les méthodes sans diaphragme et avec cathode solide sont universellement employées actuellement pour la préparation des hypochlorites et chlorates.

Le procédé Castner-Kellner pour la préparation de la soude et du chlore repose sur l'emploi d'une cathode de mercure ; il est employé dans un certain nombre d'usines, notamment dans les usines Solvay et dans les usines de la *Castner-Kellner Alkali Company ;* le procédé Rhodin, qui appartient à la *Commercial Development Corporation*, a été déclaré, en Angleterre, être une contrefaçon du précédent ; le jugement a été cassé en appel et la *Commercial Development Corporation* vient de gagner définitivement le procès devant la Chambre des Lords.

Quelques procédés avec diaphragme servent à la préparation des alcalis et du chlore ; à part le procédé Hargreaves-Bird utilisant les cathodes-filtres et le procédé Outhenin-Chalandre, qui emploie des diaphragmes tubulaires, on n'a que peu de renseignements sur les procédés actuellement employés. Les procédés de la Société *Griesheim-Elektron*, employés dans plusieurs usines allemandes et à la Motte-Breuil, près Compiègne, sont tenus dans le plus grand secret. On avait admis pendant longtemps que cette Société employait des appareils à diaphragme en ciment ; d'après Ahrens, ce serait un procédé au mercure. Cela n'a rien de surprenant ; en effet, cette Société a pris des brevets pour la transformation en soude caustique du sodium de l'amalgame. D'autre part, elle utilise le procédé Castner pour la préparation du sodium. Il est donc très admissible qu'elle emploie le procédé Castner-Kellner pour la fabrication de la soude.

Les méthodes de préparation des chlorates et hypochlorites avec diaphragme n'ont plus, à l'heure actuelle, de raison d'être, étant donnés les résultats obtenus sans diaphragme, sauf lorsque l'on désire avoir des hypochlorites à teneur élevée.

Pour ce qui est de l'électrolyse par fusion ignée, nous verrons que ce genre d'opération permet d'obtenir certains métaux, tels que le sodium et le lithium ; l'aluminium et le glucinium sont obtenus au moyen des fluorures.

Le procédé Hulin donne un alliage plomb-sodium qui, traité ultérieurement, donne de la soude, du bioxyde de sodium, du bioxyde de plomb, du sodium, etc.

L'étude de la nature des hypochlorites, de leur stabilité, de leur transformation en chlorate, etc., est encore très incomplète, bien que, dans ces derniers temps, un certain nombre de travaux aient été faits sur ces sujets à la suite de recherches électrochimiques. On admet couramment dans les ouvrages classiques que les hypochlorites se forment en milieu neutre et à froid et les chlorates, au contraire, en milieu alcalin et à chaud ; cela n'est pas tout à fait exact et il est assez curieux de constater que Gay-Lussac, en 1831, avait déjà donné une très bonne théorie lorsqu'il admettait que, lorsque l'on fait passer du chlore dans une solution alcaline concentrée et froide, il y a formation d'hypochlorite, lequel, sous l'influence d'un excès de chlore, se transforme en chlorate.

Marche de l'électrolyse sans diaphragme. — Pour bien nous rendre compte de ce qui se passe dans l'électrolyse d'un chlorure alcalin, examinons la formation des produits dès le début de l'électrolyse en supprimant la réduction par addition d'un peu de chromate de potassium et dosons l'hypochlorite et le chlorate à intervalles réguliers. Suivons, en outre, par l'analyse des gaz, l'oxydation et la réduction à l'intérieur de l'électrolyseur.

Les résultats ainsi obtenus, pour le chlorure de potassium à 20 0/0 par exemple, étant portés sur une courbe, on peut aisément se rendre compte de la marche de l'opération. Au début, le rendement (oxydation totale) est presque théorique ; il n'y a formation que d'hypochlorite et le dégagement d'oxygène (électrolyse de l'eau) est insignifiant ; puis, peu à peu, ce dégagement augmente, le rendement diminue ; la quantité d'hypochlorite formée devient de plus en plus faible, tandis que la teneur du liquide en chlorate augmente. Enfin, il arrive un moment où l'hypochlorite atteint une valeur constante, comme, bientôt après, le dégagement d'oxygène et le rendement. Le chlorate est alors le seul produit d'oxydation formé. On peut arriver ainsi à une oxydation représentant 75 0/0 de la quantité d'électricité fournie à l'électrolyseur et à un dégagement d'oxygène en représentant 25 0/0. La teneur limite en chlore actif est de 23,5 gr par litre.

Si on étudie le cas le plus général, sans addition de chromate, on obtient des courbes analogues ; mais la réduction déjà sensible au début croît avec la teneur en hypochlorite et devient constante peu après. Les valeurs auxquelles on arrive sont les suivantes : dégagement d'oxygène 15 0/0, oxydation totale 85 0/0, réduction 52 0/0, oxydation réelle (85-52) 33 0/0.

Dans ces conditions, la valeur limite en hypochlorite ne peut dépasser 12,7 gr par litre.

Si, au lieu d'électrolyser une solution de chlorure alcalin, on opère sur une solution de chlorure de calcium, on constate que le dégagement d'oxygène est plus faible ; la réduction est beaucoup diminuée par suite du dépôt de chaux agissant à la façon d'un diaphragme ; mais on ne peut malheureusement employer cette modification dans la fabrication des chlorates parce que, en raison de la faible solubilité de l'oxychlorure de calcium dans les solutions de chlorures alcalins, ce sel se forme en grande abondance et vient gêner la réaction.

La réduction, comme nous l'avons vu, peut être presque complètement annulée par l'addition de 1 0/00 environ d'acide chromique ou de ses sels. On ignore complètement la raison d'être de cette curieuse action.

Action des alcalis, de l'élévation de température et de la densité de courant. — Si l'on ajoute une petite quantité d'alcali, on remarque que les débuts de l'électrolyse sont identiquement les mêmes ; mais, au fur et à mesure que cette quantité augmente, la teneur limite en hypochlorite diminue, de même que la réduction. Par contre, le dégagement d'oxygène augmente par suite de l'électrolyse secondaire de l'eau. Avec 5 0/0 d'alcali, on ne constate plus la présence de l'hypochlorite et la réduction tombe à zéro.

L'élévation de température agit à la façon des alcalis ; mais on peut toujours constater (lorsqu'il n'y a pas d'alcali) la présence de l'hypochlorite.

L'élévation de la densité de courant d'une façon générale favorise le dégagement d'oxygène et augmente la différence de potentiel aux bornes ; cependant, à la cathode, l'élévation de densité de courant possède l'avantage de diminuer la réduction.

Hypothèses sur la formation des hypochlorites et chlorates. — Ces faits expérimentaux établis, voyons quelles sont les hypothèses sur la formation des hypochlorites et des chlorates que l'on peut regarder comme démontrées, celles qui sont à rejeter et celles qui demeurent en suspens.

Les faits établis sont les suivants :

1° Formation secondaire des hypochlorites ; il y a formation à l'anode de chlore à l'état moléculaire, ce que l'on peut aisément démontrer en employant comme anode une capsule de platine placée dans un mélange réfrigérant ; on obtient ainsi des cristaux d'hydrate de chlore, même en milieu légèrement alcalin. Ce chlore agit sur l'alcali par voie purement chimique pour donner l'hypochlorite correspondant ;

2° Le dégagement d'oxygène en milieu neutre provient de l'hypochlorite ;

3° En milieu neutre, le chlorate provient de la transformation de l'hypochlorite ;

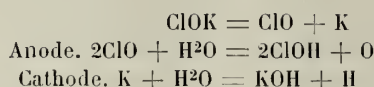
4° En milieu très alcalin, le chlorate provient également de l'hypochlorite. Ce fait peut être démontré facilement de la façon suivante : Si on électrolyse, par exemple, une solution alcaline et chaude de chlorure de potassium, on constate un certain dégagement d'oxygène et une certaine formation de chlorate ; mais on ne peut déceler la présence de l'hypochlorite ; si on ajoute dans l'appareil de l'oxyde de cobalt, lequel n'agit pas sur les chlorates, on constate que le dégagement d'oxygène correspond à la théorie ; il n'y a plus alors de chlorate formé.

Il résulte de ce que nous venons de dire qu'il faudra rejeter les hypothèses suivantes :

1° Formation primaire des hypochlorites ;

2° Formation primaire des chlorates, soit en milieu neutre, soit en milieu alcalin.

Le dégagement de l'oxygène que l'on constate dans l'électrolyse des chlorures est dû à l'électrolyse de l'hypochlorite déjà formé, laquelle doit se faire de la façon suivante :



$$ClOK = ClO + K$$
$$\text{Anode. } 2ClO + H^2O = 2ClOH + O$$
$$\text{Cathode. } K + H^2O = KOH + H$$

puis formation à nouveau d'hypochlorite.

Cette électrolyse se produirait donc comme dans le cas des autres sels, du sulfate de sodium, par exemple. On explique ainsi aisément le dégagement d'oxygène, lequel est, en effet, proportionnel à la teneur en hypochlorite, pour de faibles teneurs tout au moins. Comme nous l'avons vu, l'électrolyse du chlorure ne donne pas lieu à un dégagement d'oxygène ; il en est de même de l'électrolyse des sels halogènes, qui donnent directement le métalloïde à l'anode et non des ions complexes qui réagissent sur l'eau.

Le dégagement d'oxygène que l'on constate dans l'électrolyse provient donc de l'électrolyse secondaire de l'eau par l'intermédiaire de l'hypochlorite et non du chlorure. Cette réaction représente, dans le cas de l'électrolyse d'une solution neutre de chlorure de potassium ou de sodium, environ 25 ou 30 0/0 de la quantité d'électricité fournie à l'électrolyseur. Naturellement, en milieu alcalin, le dégagement d'oxygène augmente ; il est alors dû à l'électrolyse secondaire de l'eau par l'intermédiaire de l'alcali.

Le reste de la quantité d'électricité fournie à l'électrolyseur est employé à l'oxydation du chlorure et à sa transformation en chlorate par l'intermédiaire de l'hypochlorite.

L'hypothèse d'après laquelle l'acide chlorique résulterait de la décharge des ions ClO et OH est très admissible, mais seulement en milieu alcalin. Étant donné que la quantité absolue des ions OH croît avec l'alcalinité, elle permet de concevoir très bien pourquoi l'hypochlorite se transforme d'autant plus rapidement en chlorate qu'il y a plus d'alcali, puisque, ainsi que nous l'avons vu, avec 5 0/0 d'alcali, on ne peut plus le déceler, bien qu'il se forme réellement, comme le montre l'action de l'oxyde de cobalt.

Cette hypothèse ne peut plus être soutenue dans le cas d'un milieu neutre; il faut alors revenir à celle de l'action des ions ClO sur l'eau, c'est-à-dire à une oxydation de l'acide hypochloreux ou des hypochlorites par l'acide hypochloreux lui-même. On arrive alors à l'action purement chimique provoquée par l'acide hypochloreux mis en liberté par l'électrolyse. Tant que la teneur de la solution en acide hypochloreux est faible, cette action chimique secondaire, d'abord nulle, croîtra avec la concentration en hypochlorite jusqu'au moment où l'action chimique sera égale à l'action électrolytique ; mais, dès que l'on arrive à une certaine concentration, la réaction chimique tend à devenir plus grande que l'action électrolytique. *C'est, indépendamment de la réduction cathodique, la vraie cause de la faible teneur des solutions d'hypochlorites électrolytiques.* En effet, il est démontré que, si l'on électrolyse une solution concentrée d'hypochlorite de sodium, celui-ci est détruit par oxydation et réduction, et la teneur tend vers une valeur-limite analogue à celle que l'on obtient pour une solution de chlorure renfermant la même quantité d'alcali. De plus, la destruction de l'hypochlorite est plus grande que ne l'indique la théorie, par suite d'une « réaction accessoire de l'électrolyse » provenant de ce qu'une partie de l'acide hypochloreux mis en liberté à l'anode se transforme en acide chlorique par voie purement chimique.

On voit donc, d'après ce court exposé, combien est compliquée la théorie de l'électrolyse des chlorures alcalins, bien qu'en réalité elle ne donne naissance qu'à deux sels, l'hypochlorite et le chlorate; ajoutons, pour être complet, que l'électrolyse des chlorates, en milieu neutre ou légèrement acide, donne des perchlorates.

On voit donc en résumé:

1° *Que l'on peut obtenir des hypochlorites et chlorates par électrolyse directe des chlorures alcalins, dans des appareils sans diaphragme;*

2° *Que l'on ne peut obtenir par électrolyse directe que des hypochlorites à teneur excessivement faible;*

3° *Que le chlorate se fait aussi bien à froid qu'à chaud, mais que l'on a tout intérêt à le fabriquer vers* 60° à 80°.

Il est bien entendu qu'il ne faut pas confondre les hypochlorites obtenus par électrolyse directe avec ceux obtenus par action du chlore électrolytique sur la soude, ces derniers étant absolument pareils aux produits obtenus par les procédés chimiques ordinaires et pouvant être obtenus à haute concentration; mais leur préparation présente tous les inconvénients du chlore et de la soude électrolytiques.

Emploi des électrodes bipolaires. — Les industries ayant à employer des électrolyseurs sans diaphragme utilisent d'une façon à peu près générale des appareils à électrodes bipolaires. Voici en quoi elles consistent :

Supposons une série de bacs A, B, C... montés en tension (*fig.* 34). Chacun de ces bacs

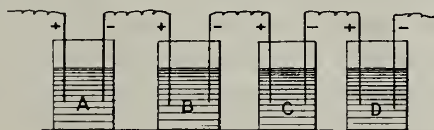


Fig. 34. — Schéma d'un montage en tension ordinaire.

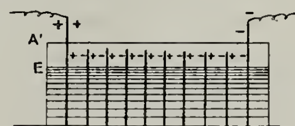


Fig. 35. — Schéma d'un montage à électrodes bipolaires.

exigera, pour une densité de courant, une température et une concentration déterminées de l'électrolyte, une certaine différence de potentiel aux bornes, mettons 5 volts. Si les machines employées sont à haut voltage, par exemple dans une papeterie où l'on désire employer à la fabrication des hypochlorites la machine servant à l'éclairage de l'usine, on aura à monter en tension une vingtaine de bains, ce qui est assez compliqué pour la réunion des électrodes et pour la circulation des liquides. Les frais de main-d'œuvre et d'entretien seront très élevés. De plus, les bornes seront rapidement attaquées par l'hypochlorite entraîné mécaniquement. Or l'oxyde de cuivre qui pourra en résulter possède au plus haut point, avec ceux de nickel et de

cobalt, la propriété de décomposer les hypochlorites. S'il en tombe dans les cuves, le rendement pourra donc baisser considérablement. Enfin, ce genre d'appareils n'ayant que deux électrodes, la moitié de la surface reste inutilisée. Si on monte plusieurs électrodes en quantité dans le même bain, la surface inutilisée diminue ; mais, d'un autre côté, l'intensité nécessaire augmente, ce qui est toujours gênant.

On tourne ces difficultés de la façon suivante :

On prend un bac long AB (*fig.* 35), dans lequel on fait des séparations avec le corps servant d'électrode, des lames de platine, par exemple. Si on relie les lames extrêmes aux pôles d'une machine, l'ensemble fonctionnera comme une série d'électrolyseurs montés en tension.

Chaque électrode jouera, d'un côté, le rôle d'anode et, de l'autre, celui de cathode.

Les avantages d'un tel système seront les suivants :

1° Pas de connexion, sauf aux extrémités ;

2° Ensemble d'un voltage assez élevé ; si l'on compte 5 volts par cuve, il faudra donc 22 cuves, soit 23 électrodes, pour un appareil que l'on pourra installer sur un circuit d'éclairage. La mise en marche et l'arrêt se feront avec la plus grande facilité, comme cela a lieu pour les lampes ;

3° Étant donné le grand nombre de bains que l'on pourra ainsi mettre en tension, on opérera toujours à faible intensité, ce qui est très avantageux sous tous les rapports ;

4° La densité de courant sera très bien répartie sur la surface de l'électrode, ce qui n'a pas toujours lieu avec l'autre système, surtout lorsque l'on emploie des lames de platine, qui sont toujours très minces et ne reçoivent le courant qu'en un seul point ;

5° Enfin, grande simplification dans la circulation du liquide, puisqu'il suffit d'une entrée et d'une sortie pour tout le système. La circulation se fait à l'intérieur même du bac, en plaçant les électrodes en chicane; il en résulte bien une perte par dérivation, mais on peut la rendre insignifiante.

Le système des électrodes bipolaires est très employé, surtout dans la fabrication des hypochlorites et des chlorates (Voir notamment les appareils Kellner et Corbin, p. 40 à 43).

## HYPOCHLORITES

Historique. — En 1820 déjà, Brand blanchissait, paraît-il, du calicot par l'électricité en le faisant passer entre deux lames de platine servant d'électrodes; mais ce ne fut guère que vers 1882 qu'un certain nombre de recherches furent faites sur le même sujet, parmi lesquelles nous citerons celles de MM. Naudin et Bidet. Le prix élevé de l'énergie à cette époque, où les dynamos commençaient seulement à être employées dans l'industrie des dépôts électrochimiques, ne laissait guère prévoir que l'opération pût devenir industrielle. Le premier appareil essayé pratiquement fut celui de M. Hermite, autour duquel on fit grand bruit, mais qui semble à peu près oublié aujourd'hui. L'appareil industriel devait servir surtout au blanchiment; en outre, un appareil domestique devait permettre de faire chez soi à bon compte de l'« hermitine », liquide précieux pour le blanchiment et la désinfection. Malheureusement, le prix élevé de l'énergie dans les villes n'en permettait pas l'emploi; en outre, il présentait l'inconvénient d'être construit à « l'envers », si l'on peut s'exprimer ainsi.

En effet, le principe de toute production électrochimique est le suivant :

« Les actions secondaires sont d'autant plus sensibles que la solution est plus concentrée et la densité de courant plus faible à l'électrode intéressée. »

Or, dans cet appareil, les cathodes étaient démesurément grandes, de sorte que la réduction était considérable et le rendement très mauvais de ce fait.

Un certain nombre d'appareils sont employés actuellement; ils sont presque tous montés à électrodes bipolaires.

L'Exposition ne renfermait qu'un seul appareil, celui de Kellner; en outre, dans les vitrines de la maison Corbin et C^ie, dans la classe 87 (Produits chimiques) et dans la classe 24 (Électrochimie), se trouvaient de nombreux échantillons de cellulose, de pâte de bois et de papier blanchis

à l'usine de Lancey (Isère), soit par le procédé Mitscherlich (bisulfite de chaux), soit par le procédé Corbin (électrolytique).

La Blanchisserie et Teinturerie de Thaon (Vosges), qui avait une exposition remarquable dans la classe 78 (Blanchiment, etc.), emploie également l'appareil Corbin.

Comme autre appareil ayant pour but la préparation de liqueurs de blanchiment, il faut signaler celui de Haas et Œttel à électrodes bipolaires en charbon. D'après le dernier dispositif de cet appareil, la circulation s'y fait automatiquement, par suite de l'utilisation du dégagement d'hydrogène.

Lorsque l'on électrolyse une solution de chlorure alcalin, le rendement en hypochlorite est, comme nous l'avons vu, presque théorique au début, puis décroît rapidement par suite de la réduction de cet hypochlorite et de son électrolyse, qui donne de l'oxygène et du chlorate. L'addition de chromate permet d'éviter la réduction et d'obtenir un titre un peu plus élevé. Mais on comprend qu'on ne peut employer cet artifice dans l'industrie des décolorants ; d'ailleurs, l'augmentation de degré est peu intéressante, du moment que l'on ne peut arriver au titre commercial.

Dans les usines de blanchiment, on se contente de préparer des hypochlorites avec une teneur de 5 à 6 gr. par litre, soit environ 2° chlorométriques. Dans ces conditions, on peut arriver à un rendement calculé, d'après la quantité d'électricité, de 60 à 80 0/0. D'ailleurs, ces solutions sont encore trop concentrées pour l'usage, puisque l'on emploie seulement des solutions titrant, suivant les matières à blanchir, 0°,2, 0°,3 et tout au plus 0°,5.

Le produit le plus employé dans la fabrication des liqueurs de blanchiment est le sel marin, qui est très bon marché et donne des solutions absolument neutres ; on a prétendu que, au cours de l'électrolyse, il se dégage du chlore et que le liquide devient alcalin; il a été démontré que cette alcalinité était inférieure à $\frac{N}{50}$ et qu'elle dépendait surtout de la disposition des électrodes et de la facilité qu'avait le chlore formé à la surface de se dégager.

Autrefois on préconisait les chlorures de calcium et de magnésium, et l'on attribuait aux solutions ainsi obtenues un pouvoir décolorant et désinfectant beaucoup plus considérable. En 1886, M. Lambert a montré qu'il n'en était rien au point de vue désinfection et que les hypochlorites électrolytiques avaient exactement les mêmes propriétés, à titre égal, que ceux obtenus par voie chimique.

La vraie raison de ce fait vient d'être donnée récemment. Lorsque l'on électrolyse une solution de chlorure alcalin, il y a formation uniquement d'hypochlorite et la solution reste neutre; si on électrolyse une solution de chlorure de calcium, il se dépose de la chaux à la cathode et le liquide renferme de l'acide hypochloreux libre, environ 50 0/0 du total ; avec le chlorure de magnésium, presque tout l'acide hypochloreux se trouve à l'état de liberté, 94,8 0/0. Ces faits sont dus évidemment à l'insolubilité relative de la chaux et de la magnésie.

On conçoit que, dans ces conditions, le blanchiment soit beaucoup plus rapide ; on sait, en effet, que l'acide hypochloreux est l'agent actif ; sa destruction donne de l'acide chlorhydrique qui en met une nouvelle dose en liberté et ainsi de suite, tandis qu'une solution neutre agit plus lentement. C'est ainsi qu'une solution électrolytique à base de sel de magnésie blanchissait en dix secondes ce qui demandait trois heures et demie en employant le sel de sodium de même degré. Il est probable que, si la dernière solution avait été légèrement acidulée, elle eût donné le même résultat.

Ces expériences sont intéressantes; elles demandent à être complétées de façon à voir si, à titre chlorométrique et acidité équivalents, les solutions électrolytiques ont vraiment un pouvoir décolorant supérieur à celles obtenues par voie chimique. Cela est peu probable.

Il y a lieu d'ajouter que les solutions à base de sels de calcium et de magnésium, étant acides, ne se conservent pas, par suite de la transformation de l'acide hypochloreux en acide chlorique; elles perdent donc rapidement leur titre.

La préparation des hypochlorites ne présente rien de bien spécial ; l'opération devra être

faite de préférence à la température ordinaire pour éviter la transformation de l'hypochlorite en chlorate; on fera donc des circulations assez rapides de liquide, que l'on refroidira au besoin dans des bacs spéciaux. La solution étendue que l'on obtient ne pouvant être commerciale, le produit sera consommé sur place.

Ces solutions ont deux applications : le blanchiment de la pâte à papier, de la cellulose, de certaines étoffes de coton, lin, chanvre, soie, ramie..., et la désinfection des eaux industrielles, des eaux d'égouts, etc.

Dans le premier cas, le sel employé pourra servir indéfiniment, ce qui permettra d'utiliser ces solutions assez concentrées, meilleures conductrices ; la préparation de la liqueur de blanchiment et son emploi se feront dans ces appareils différents. Il suffira d'y remplacer le sel entraîné mécaniquement par les matières traitées.

L'hypochlorite de chaux, de provenance chimique, que l'on emploie actuellement présente l'inconvénient d'être d'un usage peu commode, de donner, lorsque l'on fait la solution ou qu'on la transforme en hypochlorite de sodium, un dépôt volumineux, difficile à filtrer. De plus, ces solutions sont toujours alcalines et présentent l'inconvénient de favoriser la transformation de la cellulose en oxycellulose.

Les liquides électrolytiques à base de chlorure de sodium peuvent, au contraire, être obtenus rigoureusement neutres ; ils permettent de ce fait une économie d'acide.

Enfin, ces hypochlorites sont préparés par celui même qui en a besoin, ce qui est toujours avantageux, au point de vue économique, pour les usines disposant d'une forte puissance.

Étant donné le bon marché du sel, on ne cherche pas toujours à le récupérer ; on emploiera alors des solutions salées de faible teneur, de façon à utiliser le produit le mieux possible.

Appareil Kellner. — Les différents modèles de cet appareil sont employés avec succès, notamment dans les usines allemandes ; ce sont des perfectionnements successifs du type primitif.

Le modèle primitif se composait d'une cuve sur les parois de laquelle se trouvaient disposés

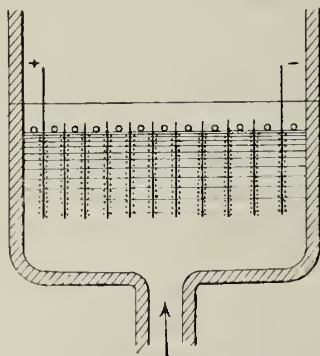


Fig. 36. — Principe de l'appareil Kellner.

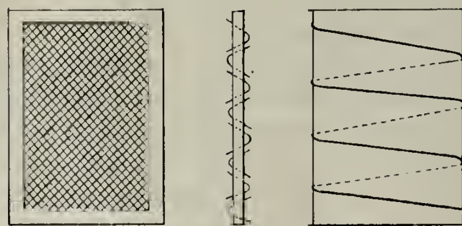


Fig. 37, 38 et 39. — Formes successives des électrodes de l'appareil Kellner.

un certain nombre de liteaux alternant d'une face à l'autre; ces liteaux portaient des électrodes se trouvant disposées en chicane, entre lesquelles circulait l'électrolyte. Ces électrodes étaient en charbon ou en métal platiné du côté servant d'anode.

Dans le cas d'électrodes en charbon, il fallait mettre à la suite de l'électrolyseur un filtre formé de coton de verre pressé entre deux lames de verre ou de porcelaine perforées, destinées à arrêter les particules de charbon entraînées et provenant de la désagrégation des électrodes. Les lames plaquées platine ne sont pas d'un bon usage. Cet appareil présentait l'inconvénient d'avoir des électrodes à grande surface ; en outre, le liquide s'échauffait beaucoup.

Le nouvel appareil qui figurait dans la classe 78 (Matériel et procédés du blanchiment, de la teinture, de l'impression et de l'apprêt des matières textiles à leurs divers états) se compose d'une cuve en grès (*fig.* 36), portant sur ses parois opposées des rainures destinées à maintenir 19 plaques de verre perforées divisant ainsi la cuve en 20 compartiments d'une largeur

de 2 cm. Ces lames de verre servent de support aux électrodes de la façon suivante : de chaque côté se trouve une toile de platine (*fig.* 37) et ces toiles sont cousues ensemble au moyen de fils de platine passant à travers les trous et assurant la conductibilité du système, tout en les maintenant.

Un autre dispositif consiste à supprimer les toiles de platine et à employer simplement des fils traversant les lames de part en part (*fig.* 38), ces lames pouvant être soit en verre, soit en ébonite ; enfin, dans le dernier modèle figurant à l'Exposition, la lame de verre (*fig.* 39) est tout

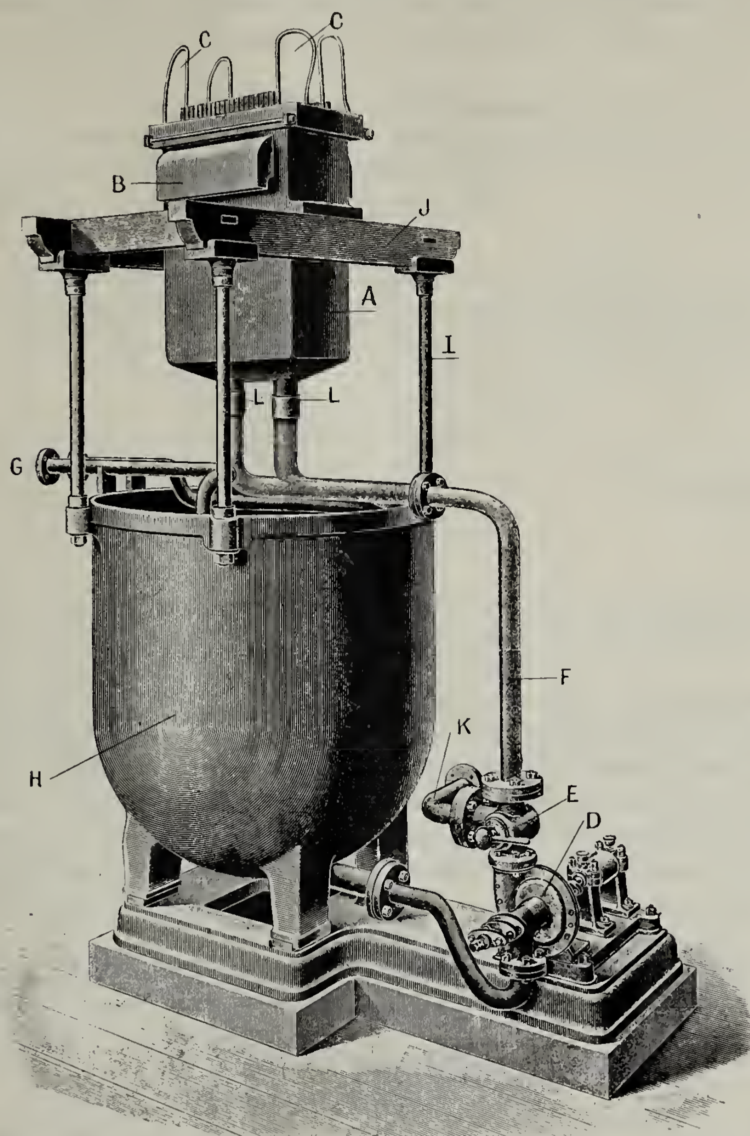



Fig. 40. — Appareil Kellner pour la fabrication des hypochlorites.

simplement entourée d'un fil de platine iridié enroulé en spirale autour d'elle. Les spires sont naturellement beaucoup plus serrées que ne l'indique le schéma ; en réalité, elles se touchent presque.

La lame de verre est maintenue dans les rainures par serrage dans des gaines en caoutchouc. Les électrodes extrêmes sont formées de cadres constitués par des tiges de cuivre habillées de tubes de platine, ces cadres supportant une toile de platine.

L'électrolyte est formé d'une solution de sel marin généralement à 10° B., soit 110 kg : m³. Il entre dans l'électrolyseur par deux grosses tubulures placées à la partie inférieure (*fig.* 40) et sort par une série de trop-pleins placés entre les lames de verre.

On règle la vitesse du débit de façon que le liquide sorte avec une teneur de 0,05 0/0 de chlore ; il tombe alors dans un collecteur placé à la partie inférieure de l'appareil et dans lequel se trouve un serpentin en plomb durci dans lequel circule un courant d'eau froide. Une pompe centrifuge, également en plomb antimonié, remonte le liquide qui circule alors d'une façon continue, jusqu'à ce qu'il renferme de 0,7 à 1 0/0 de chlore.

D'après les données de la maison, un appareil consommant en moyenne 112 volts et 114 ampères, soit 19 chevaux, peut donner en trois heures 650 litres d'une solution renfermant 0,85 0/0 d'hypochlorite, soit 5,5 de chlore actif. Le prix de ce chlore peut donc s'évaluer ainsi :

| | |
|---|---|
| 650 litres, soit 71,5 kg de sel à 2 francs les 100 kg | 1,43 franc |
| 19 chevaux-vapeur pendant 3 heures, soit 57 chevaux-vapeur-heure à 0,0294 | 1,68 — |
| Amortissement calculé sur un jour à 10 0/0 du prix | 1 — |
| Soit pour 5,5 kg de chlore | 4,11 francs |

Ce qui remet le kilogramme de chlore à 0,745.

Si nous faisons le calcul du rendement chimique en quantité, nous voyons que, marchant avec 20 électrodes pendant trois heures à 114 ampères, nous devrons obtenir :

$$\frac{20 \times 114 \times 3 \times 35{,}5}{26{,}8} = 9 \text{ kg},$$

soit un rendement de :

$$\frac{5{,}5}{9} = 61{,}2.$$

Ce rendement n'est donc pas très élevé, étant donnée la faible teneur que l'on cherche à obtenir.

Cet appareil, construit par la maison Siemens et Halske, est exploité par la maison Gebauer, de Charlottenbourg. Les électrodes sont fournies par la maison Heraeus, de Hanau (Voir p. 20), et la cuve électrolytique par la « Thonwaarenwerk Bettenhausen » de Cassel (Voir p. 18).

Appareil Corbin. — Cet appareil est employé à Lancey, dans la papeterie Bergès et dans la Blanchisserie et Teinturerie de Thaon (Vosges). Il est à électrodes bipolaires, chaque électrode se composant d'une lame de platine A (*fig.* 41 et 42) sertie dans un cadre B en ébonite ou autre matière anologue. Ces cadres sont assujettis dans une caisse C.

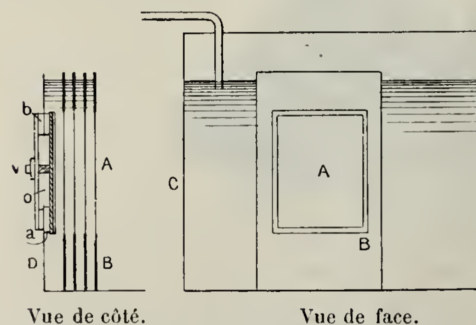


Fig. 41 et 42. — Principe de l'appareil Corbin.

Les électrodes extrêmes reçoivent le courant de la façon suivante : Les parois opposées de la cuve sont munies d'ouvertures carrées *o* à fermeture analogue à celle des trous d'homme. La plaque métallique *a* est doublée de platine ; elle obture l'ouverture par l'intermédiaire de bourrelets élastiques ; la vis *v*, servant à assurer la fermeture, amène le courant.

Pour assurer la conservation du platine, on change de temps en temps le sens du courant.

L'appareil renferme 13 lames de platine et absorbe 120 volts et 150 ampères (environ 25 chevaux). On voit donc *a priori* que le rendement en énergie doit être faible : en effet, chaque cuve absorbe près de 10 volts ; cela tient à ce que la solution employée est très étendue ; elle est seulement à 2°,5, ce qui correspond à 25 gr de chlorure de sodium par litre. Le même liquide sert indéfiniment ; malgré ces deux raisons, la perte en sel est encore assez élevée, puisqu'elle représente 20 kg pour 100 kg de pâte de bois.

Cette solution est employée de la façon suivante :

Le liquide circule d'une façon continue; il sort d'un récipient A (*fig*. 43), arrive dans l'électrolyseur B, puis dans le réfrigérant C; il passe alors dans la pile D où il se trouve en contact avec la pâte de bois chimique. Ces piles ont 2 m de diamètre, 1 de hauteur, 5 de longueur ; elles tiennent 750 kg de pâte qu'un agitateur E fait circuler continuellement. L'écoulement continu se fait au moyen d'un tambour F qui puise le liquide dans la pile d'une façon constante et l'envoie dans un bac à double fond G, d'où il est remonté dans le premier réservoir A par une pompe centrifuge. Lorsque la pâte a subi un temps de contact suffisant, on la fait passer de D en G, où elle s'égoutte.

On admet que, pour amener à l'extra-blanc 100 kg de pâte de bois, il faille 20 kg de chlorure de chaux; on voit donc que chaque appareil blanchissant en vingt-quatre heures 750 kg de pâte de bois produit l'équivalent de 150 kg d'hypochlorite, soit 50 kg de chlore.

La dépense sera donc :

| | |
|---|---|
| 150 kg de sel (20 × 7,5) à 5 francs......... | 7,5 |
| 600 chevaux-heure (25 × 24) à 0 fr. 0115 (100 francs le cheval-an)................ | 6,90 |
| Soit............... | 14,40 francs |

Ce qui remet le kilogramme de chlore à 0 fr. 286, plus les frais d'amortissement, main-d'œuvre, etc.

Chaque appareil permet à Thaon de blanchir, par 24 heures, 1 200 pièces de 100 m, avec une perte de sel de 250 gr par pièce.

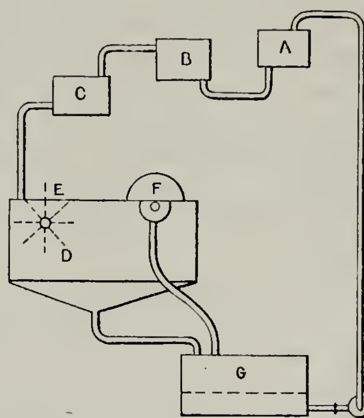


Fig. 43. — Schéma d'une installation pour le blanchiment de la pâte de bois par le procédé Corbin.

La maison Corbin et C^ie utilise cet appareil pour amener à l'extra-blanc la cellulose déjà blanchie par le procédé Mitscherlich (traitement du bois par le bisulfite de chaux sous pression); la production totale de l'usine de Lancey (Isère) atteint 4 000 tonnes.

Rappelons que c'est dans cette usine constituant alors la papeterie Bergès que furent faits les essais de préparation de chlorates électrolytiques par l'emploi d'un appareil analogue à celui que nous venons de décrire, et que, ces essais ayant pleinement réussi, la fabrication fut transportée à l'usine de Chedde dépendant de la Société des Forces motrices de l'Arve.

M. Bergès fut le promoteur de l'emploi des chutes de grande hauteur. Il a constamment travaillé à accroître la puissance de sa chute en captant l'eau de plus en plus haut. Une partie de cette chute est utilisée actuellement par le tramway Grenoble-Chapareillan.

La maison Corbin et C^ie exposait, dans les classes 24 et 87, un grand nombre de matières premières et échantillons de produits blanchis par les hypochlorites électrolytiques : cellulose, papier, étoffes, etc.

## CHLORATES

Historique. — En 1886, MM. Gall et de Montlaur prirent en France un brevet pour la préparation du chlorate de potassium par voie électrolytique; après quelques essais à l'usine de Villers-Saint-Sépulcre (Oise), ils érigèrent à Vallorbes (Suisse), à 2 kilomètres de la frontière française, la première fabrique de produits chimiques par l'électrolyse.

Cette usine eut un plein succès, et le chlorate de potassium, qui était fabriqué autrefois à peu près exclusivement en Angleterre, est obtenu actuellement par voie électrolytique en France, en Suisse et en Suède.

On est donc redevable à MM. Gall et de Montlaur non seulement de la préparation des chlorates, mais également des progrès des autres industries électrochimiques, car ce sont les résultats qu'ils ont obtenus qui permirent d'admettre comme possible à bon marché la préparation des produits chimiques par ces procédés.

La fabrication des chlorates a subi un certain nombre de transformations. Au début, alors que l'on admettait la réduction du chlorate, on employait des appareils à diaphragme, de façon à séparer le produit formé de la cathode ; à cet effet, on employait comme liquide cathodique la solution de chlorure; il y avait formation d'alcali, et le produit obtenu était envoyé dans le compartiment anodique de l'appareil suivant. Mais on en voit de suite l'inconvénient : le chlore agissant sur la potasse donne pour 1 molécule de chlorate 5 molécules de chlorure, de sorte que l'on avait très peu de chlorate à extraire des solutions; on supprima alors le vase poreux, se contentant d'entourer la cathode d'un tissu d'amiante. Comme nous l'avons vu, le chlorate est complètement irréductible en milieu neutre ou alcalin ; l'hypochlorite seul peut être transformé en chlorure par réduction.

De même on avait remarqué qu'une addition d'alcali favorisait l'opération ; elle agissait comme l'élévation de température en facilitant la transformation de l'hypochlorite en chlorate, de sorte que la diminution de teneur du produit réductible élevait le rendement; mais il ne fallait pas tomber dans l'excès inverse, parce qu'alors l'alcali provoquait une décomposition secondaire de l'eau et produisait de ce fait une perte de courant; la quantité de 2 0/0 était celle qui donnait les meilleurs résultats.

Pour éviter cette décomposition partielle de l'eau, un certain nombre de brevets furent pris. Ils consistaient à remplacer l'alcali par d'autres sels, tels que les carbonates, bicarbonates, etc.

Dans ces conditions, on pouvait opérer sans diaphragme, surtout en ayant soin de diminuer les surfaces cathodiques de façon à amoindrir la réduction par l'élévation de densité du courant.

Mais un nouveau perfectionnement important fut introduit par l'emploi des chromates. Comme nous l'avons vu, une trace suffit pour éviter complètement la réduction des hypochlorites ; alors tout se simplifie : plus de réduction, économie du fait de l'alcali devenu inutile, enfin la température n'a plus aucune influence et les chlorates se forment aussi bien à froid qu'à 70°.

Appareils. — Il n'est donc plus besoin d'appareils spéciaux pour la fabrication ; une cuve quelconque en grès, ciment, contenant des électrodes disposées soit en quantité, soit bipolaires, suffit.

Le seul inconvénient, c'est que le platine seul peut être employé comme électrode ; le charbon se désagrège, en effet, rapidement et donne en outre des solutions colorées ; on comprend donc que, pour diminuer le capital engagé, on cherche à avoir des appareils à haute production, c'est-à-dire à forte densité de courant ; évidemment la dépense en énergie sera de ce fait plus considérable par suite de l'élévation de tension. En raison de la grande densité de courant, l'échauffement de la solution est considérable; mais nous avons vu qu'il n'y a à cela aucun inconvénient, au contraire; dans le cas du chlorate de potassium, il suffit de laisser refroidir la solution pour avoir directement le produit cristallisé.

Dans le cas du chlorate de sodium, ce sel étant plus soluble que le chlorure, on est obligé d'évaporer une partie de la solution, après avoir poussé l'électrolyse aussi loin que possible. L'évaporation se fait dans des appareils à effets multiples, dont l'usage se généralise de plus en plus dans les usines de produits chimiques. Le chlorate de sodium est préféré, dans certains cas, à celui de potassium, car il est beaucoup plus soluble à froid.

Les usines de Saint-Michel-de-Maurienne et de Vallorbes utilisent les appareils Gall et de Montlaur, dans lesquels, en principe, le diaphragme est formé d'un tissu d'amiante enveloppant la cathode en nickel; les anodes sont en platine pur et ont environ 20 sur 30 cm. L'usine de Chedde utilise les appareils Corbin, analogues à ceux que nous avons décrits pour la fabrication des hypochlorites. Un certain nombre de ces appareils sont mis en tension, les machines étant de 700 volts. L'usine de Mansboé (Suède) utilise un appareil sans diaphragme de Carlson ; les usines de Niagara-Falls utilisent, l'une le procédé Franchot et Gibbs, l'autre l'appareil de Blumenberg, construit d'après le principe que nous indiquions plus haut, diaphragme et liquide anodique alcalin. L'appareil Hurter se compose d'une cuve en fonte, recouverte d'une légère

couche de ciment agissant comme diaphragme ; ces cuves sont empilées les unes sur les autres et séparées par des matières isolantes ; au fond de chaque cuve est fixée une électrode en platine qui plonge dans la cuve au dessous et sert d'anode ; la couche de ciment agit comme diaphragme. Cet appareil est employé à l'usine de Bay-City.

Cependant il est certain que tous ces appareils doivent être plus ou moins modifiés à l'heure actuelle et que l'on a dû partout supprimer les diaphragmes et employer les chromates. Quant à la densité de courant employée, elle dépasse 10 ampères par décimètre carré et peut être plus ou moins variable suivant les conditions économiques, réglées, d'une part, d'après le prix du platine, qui immobilise un certain capital, et, d'autre part, d'après le prix de l'énergie. En raison de la première considération, il y a intérêt à marcher à forte densité de courant ; d'après la seconde, au contraire, il vaut mieux opérer à faible densité de courant et, par conséquent, à basse tension.

Utilisation de l'énergie dans la fabrication des chlorates. — La formule brute de la préparation des chlorates est la suivante :



$$ClK + 3H^2O = ClO^3K + 6H.$$

On voit donc que 64,5 gr de chlorure de potassium en donnent 122,5 de chlorate et 6 d'hydrogène.

Pour produire cette réaction, il y a 6 valences rompues ; il faudra donc six fois 96 540 coulombs (ou six fois 26,8 ampères-heure).

Un ampère-heure donnera donc :

$$\frac{122,5}{6 \times 26,8} = 0,762 \text{ gr } ClO^3K.$$

Si on admettait un rendement chimique en quantité de 65,5 0/0, le reste de la quantité d'électricité étant employé à l'électrolyse de l'eau, nous arrivons au chiffre de 0,5 gr par ampère-heure. Supposons aux bornes du bain une tension moyenne de 5 volts, on trouve qu'il faut par kilogramme de chlorate de potassium environ 10 kilowatts-heure. Pour le sel de sodium, il faudra un peu plus.

Un cheval-jour donnera donc un peu moins de 2 kg de chlorate de potassium, soit, avec les données établies plus haut, près de 700 kg par cheval-an.

Dans l'évaluation de la production d'une usine, il faut faire entrer en ligne de compte non seulement l'énergie fournie aux électrolyseurs, mais encore le rendement des machines, la perte de charge, l'énergie employée dans les différents services : éclairage, force motrice, ateliers de réparations, enfin le chômage provenant soit de réparations, soit de manque d'eau, etc.

Pratiquement, on estime donc qu'un cheval-an produit environ une demi-tonne de chlorate de potassium.

Dégagement d'hydrogène. — La production d'hydrogène est considérable dans la fabrication des chlorates. Un certain nombre d'ouvrages indiquent 100 m³ par tonne de produit ; ce chiffre est bien au-dessous de la réalité.

D'après l'équation citée plus haut, 64,5 gr de chlorure de potassium donnent 122,5 gr de chlorate et 6 d'hydrogène, soit pour 1 tonne de chlorate $\frac{1\,000 \times 6}{122,5}$, soit 49 kg d'hydrogène ou 545 m³.

Il faut ajouter à cela que l'on n'utilise guère que les deux tiers de la quantité d'électricité fournie à l'électrolyseur, le reste étant employé à l'électrolyse secondaire de l'eau. Il faudra donc ajouter par tonne environ :

270 m³ d'hydrogène ;
et 135 m³ d'oxygène.

Comme l'on n'emploie pas de diaphragme, ces gaz sont mélangés et ne peuvent être uti-

lisés ; ils s'échappent en entraînant, à l'état vésiculaire, une certaine quantité des sels de la solution.

On voit d'après cela que les salles d'électrolyse devront être très bien ventilées, sinon les accidents les plus graves seraient à craindre.

Ce ne sont d'ailleurs pas les seuls accidents à redouter du fait du chlorate de potassium. En 1898, une explosion de 156 tonnes de chlorate détruisait une partie de l'usine de Saint-Helen, appartenant à l'United Alcali Co Limited, tuant cinq ouvriers et en blessant quarante à cinquante. Cette explosion était due, paraît-il, à l'embarillage du produit dans des fûts en bois.

On a proposé, pour utiliser l'énorme quantité d'hydrogène produite accessoirement et qui est inutilisable, d'ajouter à la solution de chlorure le nitrate correspondant, lequel se trouve ainsi transformé en alcali et ammoniaque :



$$AzO^3Na + 8H = NaOH + AzH^3 + 2H^2O.$$

Nous ne savons si ce procédé est employé ; c'est assez peu probable ; en effet, l'azote nitrique a plus de valeur que l'azote ammoniacal, et le gain réalisé sur la vente de l'alcali est bien incertain, étant donné qu'il faudrait compliquer une réaction simple, diminuer la densité de courant, c'est-à-dire augmenter la dimension des électrodes en platine et faire des appareils permettant de recueillir l'ammoniaque, puisque l'on opère à chaud.

Enfin, il faudrait séparer la soude qui, si elle est bien concentrée, favorisera l'électrolyse secondaire de l'eau.

Ce procédé semble donc *a priori* bien peu pratique.

Un autre moyen pour utiliser l'hydrogène a été proposé par MM. Franchot et Gibbs ; il consiste à employer une cathode de cuivre oxydée superficiellement ou formée par un aggloméré d'oxyde de cuivre. L'hydrogène réduit l'oxyde de cuivre ; il y a donc, d'une part, diminution de polarisation mécanique, l'hydrogène ne se dégageant plus et, d'autre part, diminution de la force contre-électromotrice, par suite de la formation d'eau. La diminution de différence de potentiel aux bornes est donc beaucoup diminuée et, par conséquent, la quantité d'énergie nécessaire. Lorsque les cathodes sont complètement réduites, on les retire, on les lave et on les oxyde par calcination. On a donc de ce fait une main-d'œuvre assez considérable, qui compense peut-être la diminution de l'énergie nécessaire.

Il y a lieu de remarquer qu'il semble bien difficile d'employer ce procédé sans diaphragme, tout au moins sans envelopper les cathodes, l'oxyde de cuivre qui peut se détacher des électrodes possédant, à un degré très élevé et presque autant que l'oxyde de cobalt, la propriété de décomposer les hypochlorites.

Production des chlorates. — Il y a actuellement une dizaine d'usines qui fabriquent des chlorates de potassium, sodium et baryum. Parmi ces usines, il faut citer :

| | | | Production annuelle |
|---|---|---|---|
| Saint-Michel-de-Maurienne. | France. | Société d'Électrochimie .............. | 1 000 tonnes |
| Cheddes.................. | France. | Société des forces motrices de l'Arve .. | 4 000 — |
| Vallorbes................. | Suisse. | Société d'Électrochimie............... | 1 200 — |
| Mansboe .................. | Suède. | | 1 250 — |

Les usines de Bay-City (Etats-Unis), 1 500 chevaux, et Alby (Suède) fonctionnent depuis peu ; leur production n'est pas connue, pas plus que celle des usines du Niagara appartenant à la National Electrolytic C°, qui utilise 2 200 chevaux, de Rheinfelden et de Bitterfeld (Allemagne), qui appartiennent à la Chemische Fabrik Griesheim-Elektron, de Francfort-sur-le-Mein.

La plupart des usines empruntent leur énergie aux chutes d'eau ; seule la dernière utilise la houille ; mais, étant donnée la grande quantité d'énergie nécessaire, comme nous l'avons vu, pour fabriquer le chlorate, il semble peu probable que cette usine puisse fonction-

ner; peut-être même ne fabrique-t-elle plus de chlorate, de même que celle de Leopoldshall (Allemagne), qui a arrêté cette fabrication en 1899.

La production annuelle des chlorates électrolytiques représente de 10 à 12 000 tonnes pour une puissance de 25 000 chevaux.

Produits exposés. — La plupart des usines productrices de chlorates avaient exposé.

MM. Corbin et C^ie^ (Société des Forces Motrices de l'Arve) possèdent à Chedde la plus importante usine pour la fabrication des chlorates. La puissance de la chute est de 12 000 chevaux ; l'installation comprend 8 dynamos de 800 chevaux, fournissant chacune environ 560 kilowatts aux électrolyseurs du système Corbin, analogues à ceux décrits pour la préparation des hypochlorites. Les machines étant de 700 volts et 800 ampères, on voit qu'il suffit, grâce aux électrodes bipolaires, de mettre en tension un nombre très restreint de bacs. Le rendement chimique rapporté à la quantité d'électricité fournie aux électrolyseurs, qui était de 50 0/0 lors des débuts de l'usine (1897), s'élève actuellement à 80 0/0.

La production de l'usine, dont une partie seulement de l'énergie est employée à la fabrication des chlorates, est de 3 000 tonnes de chlorate de potassium et 1 000 tonnes de chlorate de sodium. Elle fabrique également, par action secondaire, une certaine quantité de chlorate de baryum et d'ammonium. Des échantillons de ces différents produits et des matières figuraient dans les vitrines des classes 87 (Produits chimiques) et 24 (Électrochimie). Ces vitrines renfermaient, également, des perchlorates de potassium et d'ammonium fabriqués par la Société.

La Société d'Électrochimie utilise les procédés Gall et de Montlaur pour la fabrication des chlorates dans ses usines de Vallorbes (situées en Suisse, à 2 km de la frontière française) et de Saint-Michel-de-Maurienne (Savoie). Sa vitrine renfermait du chlorate de potassium en cristaux fins et gros, du chlorate de sodium en gros cristaux, des perchlorates de potassium, d'ammonium, etc. Dans des coupes se trouvaient de magnifiques cristaux de chlorate de potassium de plusieurs centimètres de côté et une couronne de 30 cm de diamètre, dont certains cristaux avaient jusqu'à 5 et 6 cm.

L'Exposition collective allemande de Produits chimiques (Section d'Électrochimie) ne renfermait pas de chlorates.

Comme nous l'avons vu précédemment, les usines de Bitterfeld et Rheinfelden en ont fabriqué au début ; mais ces usines ont dû cesser leur fabrication en raison de la baisse de prix considérable résultant de l'introduction sur le marché des chlorates électrolytiques, qui ont fait baisser, pour le sel de potassium, les prix de 200 francs à 65 francs en l'espace de peu de temps. La Chemische Fabrik Griesheim-Elektron, propriétaire de ces usines, et qui exposait tous les produits de sa fabrication, s'est, en effet, abstenue de mettre des chlorates et ne les signale pas parmi les produits de sa fabrication. La production de ces usines était d'ailleurs peu importante.

L'usine d'Alby (Suède) exposait un certain nombre d'échantillons de chlorate de potassium. Cette usine, de construction récente (1899), n'indique encore rien au sujet de sa production. L'usine de Mansboe (Suède), dont la production a été de 1 264 tonnes en 1898, n'avait pas exposé ; de même, l'usine de Bay-City (Etats-Unis), ouverte en 1900.

L'École de Physique et de Chimie industrielles de la Ville de Paris exposait, à côté de chlorate de potassium, des bromate et iodate préparés dans son laboratoire d'électrochimie.

## ALCALIS ET CHLORE

Principes de l'électrolyse des chlorures alcalins avec diaphragme. — Cette méthode, la plus simple en apparence, est évidemment celle qui s'est présentée la première à l'idée de ceux qui ont cherché à électrolyser les solutions salines, dans le but d'en retirer des alcalis et du chlore. *A priori*, cette action paraît, en effet, très simple ; on a à l'anode du chlore, à la cathode de l'alcali, produit par réaction secondaire du sodium sur l'eau avec dégagement d'hydrogène ; en fait, elle est plus compliquée.

Cette méthode a bien des défauts : outre ceux ayant trait au principe même de l'appareil, il faut ajouter ceux provenant du diaphragme lui-même, qui offre une certaine résistance au passage du courant, d'où augmentation de la différence de potentiel aux bornes nécessaire pour produire l'électrolyse et, en conséquence, de la quantité d'énergie nécessaire pour fabriquer une quantité donnée de matières.

Les diaphragmes nécessitent la complication des appareils; ils sont d'un prix élevé, relativement fragiles et présentent le gros inconvénient d'être plus ou moins attaquables par les alcalis et le chlore, de sorte que les produits formés tiennent toujours une certaine quantité de silice, d'alumine ou de matière organique, suivant le mode de construction du diaphragme.

Les liquides anodique et cathodique peuvent passer dans le compartiment de signe contraire, pour trois raisons différentes :

1° Par diffusion simple, cette diffusion étant proportionnelle à :

*a*) La surface du diaphragme;

*b*) La différence de concentration du produit considéré sur les deux faces du diaphragme ;

*c*) Un coefficient de diffusion correspondant à ce produit ;

*d*) La durée de l'essai.

On voit donc que, si l'on cherche à atteindre de grandes concentrations, la diffusion deviendra de plus en plus considérable ;

2° Par suite de la différence entre les vitesses de transport des anions et des cathions ;

3° Par suite de l'osmose électrique.

L'ensemble de ces phénomènes est encore très mal connu ; toujours est-il que le rendement baisse de plus en plus dans le compartiment cathodique et qu'il arrive un moment où la diffusion, provenant de l'ensemble de ces trois phénomènes, est égale à la production. Le système est alors en équilibre. Pour ces raisons, un appareil à diaphragme devra être vidé dès que le courant ne passera plus. Ce raisonnement s'applique naturellement à tout procédé à diaphragme.

Les liquides anodique et cathodique tendront donc à se mélanger dès le début de l'électrolyse. Il y a lieu de remarquer que c'est l'alcali surtout qui est intéressant à considérer : en effet, lui seul augmente d'une façon régulière dans le compartiment cathodique. Le chlorure, en admettant que le volume des liquides anodique et cathodique soit égal, diminue sensiblement de la même quantité dans les deux compartiments. Si le volume anodique est plus grand (en supposant la concentration la même au début), ou, ce qui revient au même, si on maintient saturée la solution anodique, il peut en passer à la cathode ; mais cela a peu d'importance, puisqu'il est sans action chimique. Quant au chlore, peu soluble dans l'eau, il l'est encore moins dans une solution de chlorure; sa diffusion sera donc de ce fait insignifiante.

Le seul corps dont le passage d'un compartiment dans l'autre est intéressant à considérer est donc l'alcali.

L'alcali traversant ce diaphragme rencontre du chlore et donne, de ce fait, de l'hypochlorite, lequel, en présence d'un excès de chlore, donne de l'acide hypochloreux, qui se dégage en partie avec le chlore et, d'autre part, se transforme, par voie chimique, en acides chlorique et chlorhydrique, formant avec l'alcali du chlorate et du chlorure.

Il y a lieu d'ajouter que cet acide hypochloreux, plus soluble que le chlore, pourra participer à l'électrolyse et produire la décomposition de l'eau avec formation d'oxygène, d'où perte de courant ; mais, action beaucoup plus grave, cet oxygène contribuera à l'attaque des charbons.

En définitive, le passage de l'alcali dans le compartiment anodique donnera du chlore mélangé d'acide hypochloreux, occasionnera une perte de courant du fait de la formation de chlorate, hypochlorite et oxygène et favorisera l'attaque des charbons.

On évitera donc ces réactions secondaires en maintenant le liquide anodique constamment acide ; cet acide, détruit peu à peu par l'alcali correspondant à l'ensemble des réactions que nous venons d'indiquer, représentera sensiblement la perte de courant.

Ce fait est bien connu au point de vue industriel ; il paraît avoir été indiqué par Lesueur en 1891 ;

on ajoutait alors de l'acide chlorhydrique au liquide anodique. La Société « La Volta » qui avait, dans la section suisse (Groupe V, Électricité), une vitrine remarquable, emploie un appareil, dont nous parlerons plus loin (p. 60), destiné à produire l'acide chlorhydrique nécessaire par combinaison directe de l'hydrogène avec une partie du chlore produits dans l'appareil. Le chlore utilisé à cet effet représente d'une façon bien nette la perte en quantité d'électricité. Si, dans l'électrolyse avec diaphragme, l'acidité doit être maintenue sensiblement constante, il en est de même de la teneur en chlorure ; il ne faut pas oublier, en effet, que la diminution en est considérable, puisque, par valence rompue (26,8 ampères-heure), on détruit une molécule-gramme de chlore et une d'alcali, tandis que, dans l'opération sans diaphragme, on en restituait les 5/6, par suite de la formation du chlorate ; avec diaphragme, la perte en chlorure est donc 6 fois plus considérable.

On maintient en général le liquide anodique saturé, soit en plaçant du chlorure dans l'appareil, soit en faisant circuler le liquide à travers des vases saturateurs.

Les appareils à diaphragme sont utilisés dans un certain nombre de procédés, parmi lesquels nous citerons ceux de :

Spilker et Lœwe, caractérisé par l'emploi d'un diaphragme formé d'une feuille de papier-parchemin recouverte d'oxychlorure alcalino-terreux plus ou moins basique, obtenu en ajoutant à l'anolyte 2 0/0 de chlorure de calcium ou de magnésium. Ces oxychlorures empêchent l'action de l'hypochlorite formé en raison de l'alcalinité du milieu, auquel on ajoute, dès le début, des oxydes alcalino-terreux. Lorsque la couche d'oxychlorure atteint une épaisseur de 8 mm, on diminue l'addition de chaux. On n'a aucune indication sur les anodes employées ; mais il est évident, d'après ce que nous avons vu, que le charbon ne doit pas convenir. Ce procédé a été essayé par la « Vereinigte Chemische Fabrik » de Léopoldshall, près Stassfurth (Allemagne), mais n'a pas donné de résultat et a été abandonné ;

Lesueur, dans lequel le diaphragme, horizontal ou plutôt légèrement incliné pour faciliter le dégagement de l'hydrogène, est formé d'un double carton d'amiante. Il a été utilisé à l'usine de Rumford-Falls, abandonné, puis repris, à Berlin-Falls (États-Unis) ;

Greenwood, dont le diaphragme est formé de pièces non poreuses s'emboîtant les unes dans les autres et dont les interstices sont bouchés avec de l'amiante constituant la cloison poreuse. Ce procédé, essayé à l'usise de Windsford, n'a pas réussi et la fabrication a été arrêtée en 1900.

Signalons enfin les procédés Hargreaves-Bird et Outhenin-Chalandre, sur lesquels nous reviendrons tout à l'heure, et l'appareil de M. Peyrusson, dont nous avons déjà parlé (p. 15).

Parmi les appareils intéressants en principe, mais n'ayant pas été exploités, nous citerons celui de M. Lambert, qui utilise des électrodes bipolaires alternant avec des cloisons poreuses, placées dans des cadres de filtre-presse, et celui de Hulin utilisant une cathode-filtre à travers laquelle s'écoule la solution de chlorure de sodium. En réglant convenablement la vitesse, on arrive à obtenir de la soude à peu près exempte de chlorure, qui se trouve ainsi soustraite aux actions secondaires au fur et à mesure de sa formation.

Principes de l'électrolyse des chlorures alcalins sans diaphragme, avec une cathode de mercure. — Le principe du procédé consiste à prendre du mercure comme cathode, de sorte que le métal formé est dissous à l'état d'amalgame ; le chlore se dégage à l'anode, platine ou charbon.

L'amalgame formé est traité par l'eau pour donner l'alcali ; l'attaque est assez lente dans ces conditions. Si l'on a simplement un dosage à faire, il suffit d'ajouter un excès d'acide et de titrer cet excès ; l'attaque est alors très rapide.

En opérant sur le principe simple que nous venons d'indiquer, il y aura toujours une certaine attaque de l'amalgame formé par l'eau et, par conséquent, formation d'alcali et d'hypochlorite ; le chlore pourra également être mélangé d'acide hypochloreux et conséquemment d'hydrogène, d'oxygène et d'acide carbonique (dans le cas d'anodes en charbon). On peut diminuer cette formation d'hypochlorite en acidifiant le liquide anodique ; mais on facilite beaucoup l'attaque de l'amalgame et, par conséquent, le dégagement d'hydrogène.

On a cherché, pour éviter la perte de mercure provenant du transvasement et de la manipulation, de faire toute l'opération dans le même appareil; à cet effet, on emploie le mercure comme électrode bipolaire en utilisant le dispositif suivant :

Un récipient plat A (*fig.* 44) renferme une certaine quantité de mercure pouvant être remué par un agitateur B. L'anode, en platine ou charbon, est placée dans un récipient sans fond C, contenant une solution de chlorure de sodium, par exemple. Ce récipient est fermé par un bouchon à deux trous permettant le passage de l'anode et d'un tube pour le dégagement du chlore. La cathode est formée d'une lame de fer ou de nickel plongeant dans l'eau rendue légèrement conductrice, au début, par une petite quantité de soude.

Dans le vase C, la couche de mercure sert de cathode et se charge de sodium; dans le vase A, elle agit comme anode; le sodium est oxydé et il se dégage sur la cathode de l'hydrogène provenant de la décomposition de l'eau.

C'est le principe du procédé Castner, représenté schématiquement figure 45.

Ce procédé présente un grave inconvénient.

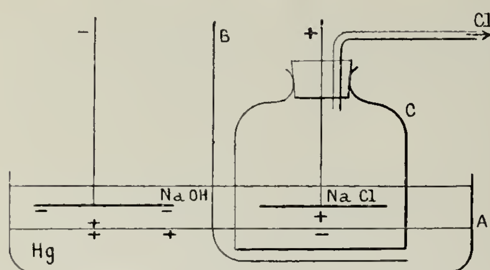



Fig. 44. — Principe du procédé Castner.

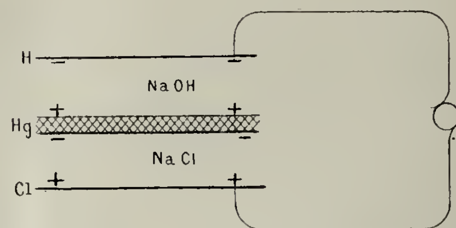



Fig. 45. — Schéma du procédé Castner.

Dans ce que l'on peut appeler le compartiment anodique, il y a toujours une certaine électrolyse de l'eau, quelque insignifiante soit-elle; d'autre part, une partie de l'amalgame formé réagit dans ce compartiment sur l'eau pour donner de la soude et de l'hydrogène; il y a donc, de ce fait, une certaine perte de sodium sur la quantité théorique; or la quantité d'électricité passant pendant un temps donné par la surface cathodique du mercure sera la même que celle qui passe par la surface anodique; comme il y a une perte de sodium, il y aura une quantité correspondante d'oxygène libre, vis-à-vis de laquelle le mercure agira comme anode soluble et donnera de l'oxyde. Cette quantité d'oxyde sera d'autant plus grande que le sodium met un certain temps pour aller de la surface cathodique à la surface anodique et qu'une partie du sodium reste à l'état d'amalgame.

Il y a donc de ce fait une perte considérable; en outre, l'oxyde formé n'est pas conducteur et, si l'appareil est au repos, l'arrêt du courant est presque instantané. Si l'agitateur fonctionne, le courant passe; mais la différence de potentiel aux bornes est considérablement augmentée, et la quantité d'oxyde formée croît peu à peu. Cette attaque du mercure est considérable; outre les frais supplémentaires dus à la dépense d'énergie, il faut donc considérer également, au point de vue industriel, la transformation de cet oxyde en métal et les frais de main-d'œuvre, les pertes, etc., qui en résultent et qui sont très importants.

Nous avons vu que l'amalgame de sodium était difficilement attaqué par l'eau pure ou alcaline. L'attaque se fait très bien en milieu acide, ce à quoi on ne peut songer. Mais on arrive très bien à produire cette attaque en milieu alcalin en mettant l'amalgame en contact avec une lame de fer ou de nickel; il y a alors formation d'un couple; le sodium se dissout en donnant de la soude, et l'hydrogène se dégage sur la lame métallique.

C'est ce principe que Kellner a appliqué; à cet effet, il relie la cathode au mercure (*fig.* 46); dans ces conditions, la surface de celui-ci reste constamment propre; il n'y a plus de dégagement gazeux ni de formation d'oxyde à sa surface; l'hydrogène se dégage sur la cathode. Le mercure n'agit plus comme électrode bipolaire. Le principe du procédé Castner-Kellner est représenté

schématiquement figure 47. Pratiquement, cette disposition peut être réalisée en employant une cuve métallique en fer, par exemple, communiquant avec le pôle négatif de la dynamo et dans laquelle se trouve le mercure-cathode.

Au sujet de l'énergie dépensée, il y a lieu de remarquer que la tension nécessaire pour produire l'électrolyse, toutes conditions égales, est plus faible si l'appareil donne de la soude que si l'on obtient de l'amalgame traité d'un autre côté; en effet, l'attaque du sodium par l'eau donne lieu à une certaine force électromotrice qui, si les deux opérations se font dans le même appareil, vient en diminution de la tension nécessaire à l'électrolyse.

Les appareils à cathode de mercure sont utilisés dans le procédé Castner-Kellner, qui emploie une cuve à trois compartiments, deux anodiques et un cathodique au centre, communiquant entre eux par la partie inférieure ; au fond se trouve une légère couche de mercure qui se charge de sodium dans les compartiments anodiques et se trouve régénérée dans le compartiment cathodique. La circulation du mercure est faite au moyen d'un balancement de la cuve. Ce procédé, mis à l'essai par l'Aluminium Company, dans son usine d'Olbury, est exploité

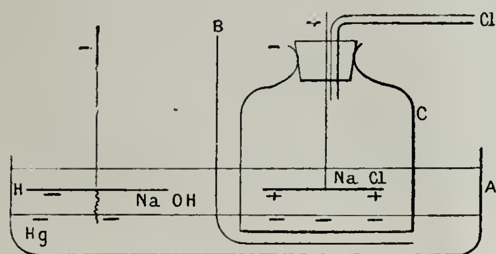


Fig. 46. — Principe du procédé Castner-Kellner.

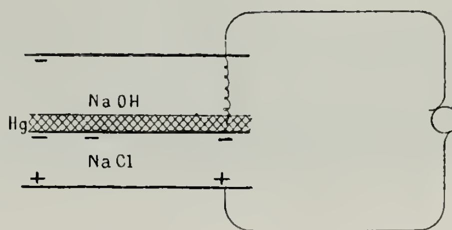


Fig. 47. — Schéma du procédé Castner-Kellner.

depuis 1896 à l'usine de Weston-Point, province de Runcorn (Angleterre), par la Castner-Kellner C°, qui dispose de 3 500 chevaux, et par le « Castner Alkali C° », qui dispose de 2 000 chevaux à Niagara-Falls, mais dont la puissance sera portée à 6 000 chevaux ; par le « Consortium für Elektrochemische Industrie », qui dispose de 4 500 chevaux, à Gölling, près Hallein (Autriche).

La Société Solvay, qui emploie un appareil décrit plus loin, possède la licence des procédés Castner-Kellner pour le continent. Nous étudierons également l'appareil Rhodin, qui figurait à l'Exposition et qui emploie également une cathode en mercure.

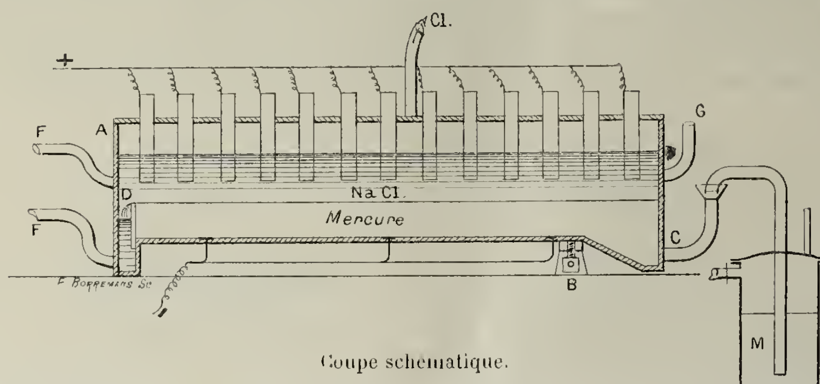
Appareil Solvay. — Le principe de cet appareil à marche continue est de faire simplement l'amalgame que l'on traite dans un autre pour régénérer le mercure et obtenir l'alcali. Il était intéressant d'avoir des appareils d'une très forte production continue et demandant aussi peu de main-d'œuvre que possible. Les systèmes employés précédemment, tels que le balancement des cuves, l'emploi de pistons plongeurs ou de pompes, l'écoulement sur des plans ou dans des rigoles inclinés, présentaient l'inconvénient de ne s'appliquer qu'à des appareils de petites dimensions ou d'occasionner des troubles lorsque, le mouvement du mercure étant arrêté, l'appareil se dégarnissait de mercure par endroits, le courant continuant à passer.

Dans l'appareil Solvay, l'écoulement se fait à la faveur d'un trop-plein. Cet appareil (*fig.* 48 et 49) se compose d'une simple cuve rectangulaire A, pouvant avoir de grandes dimensions en longueur et en largeur, et dont la surface, aussi grande qu'on le désire, permet une forte production. Le fond reste toujours couvert de mercure, lequel arrive par le tube C, le trop-plein se trouvant à la partie opposée en D; le mercure qui s'échappe s'écoule par le tube F (inf.). La saumure peut circuler en sens inverse du mercure et entrer, par exemple, en F (sup.), pour ressortir en G : le système anodique est formé d'un grand nombre de charbons disposés en quinconce. Le mercure régénéré est remonté au moyen d'un monte-jus M.

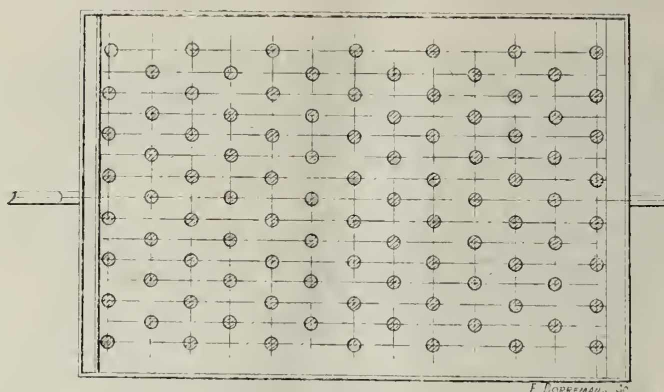
L'avantage de ce dispositif est le suivant : l'amalgame obtenu est très léger et reste à la surface du mercure où il a été formé ; il a peu de tendance, en vertu de sa légèreté, à se

mélanger avec le mercure de la partie inférieure, au point que l'on peut arriver à obtenir ainsi un amalgame solide flottant à la surface du bain mercuriel. Sans arriver à ce point, on voit que, d'une façon générale, c'est la partie la plus légère et, par conséquent, la plus riche en sodium qui s'écoule par le trop-plein ; on a donc ainsi une opération méthodique. On règle le débit de la façon la plus avantageuse pour assurer le meilleur rendement au point de vue de l'utilisation du courant. L'obtention d'amalgame solide ou tout au moins pâteux n'est même pas un obstacle, s'il répond à une bonne utilisation.

Dans cet appareil, on perd l'énergie résultant de l'attaque du sodium par l'eau. Cette attaque se fait dans un appareil présentant un dispositif analogue à celui de l'électrolyseur et dans lequel on fait également circuler le mercure et la solution en sens inverse. On peut alors, par un dispositif spécial, récupérer l'énergie perdue dans l'électrolyseur proprement dit.




Coupe schématique.



Plan.

Fig. 48 et 49. — Appareil Solvay pour la fabrication électrolytique des alcalis.

La Société Solvay avait exposé dans la section belge des classes 24 (Electrochimie) et 87 (Produits chimiques) deux séries de bocaux renfermant de très jolis échantillons de soude caustique cristallisée à 77-78 0/0 NaO et de potasse caustique cristallisée, du chlorure de chaux à 110° et les matières premières : chlorure de potassium et de sodium raffinés.

L'appareil Solvay est exploité dans les usines suivantes :

1° Jemeppe-sur-Sambre (Belgique). Cette usine, appartenant à la Société Solvay et C^ie^, est à proximité du bassin houiller de Charleroi; elle a été construite, en 1897-98, sur une superficie de 30 hectares. Elle dispose d'une puissance totale de 1 500 chevaux et emploie 120 ouvriers. Elle fabrique 6 000 tonnes de produits, soude et chlorure de chaux. L'Exposition de la classe 24 (section belge) renfermait trois photographies de cette usine : une vue d'ensemble, une vue de la salle des machines et une vue de la salle des électrolyseurs (*fig.* 50) ;

2° Northwich (Angleterre) dépend de la Société Brunner, Mond and C° ;

3° Osternienburg (Anhalt) appartient à la « Deutsche Solvay Werke Gesellschaft » ; elle fabrique de la potasse et de la soude caustiques et du chlorure de chaux. La production totale



Fig. 50. — Salle d'électrolyse de l'usine de Jemeppe-sur-Sambre (Belgique) (Solvay et Cie).

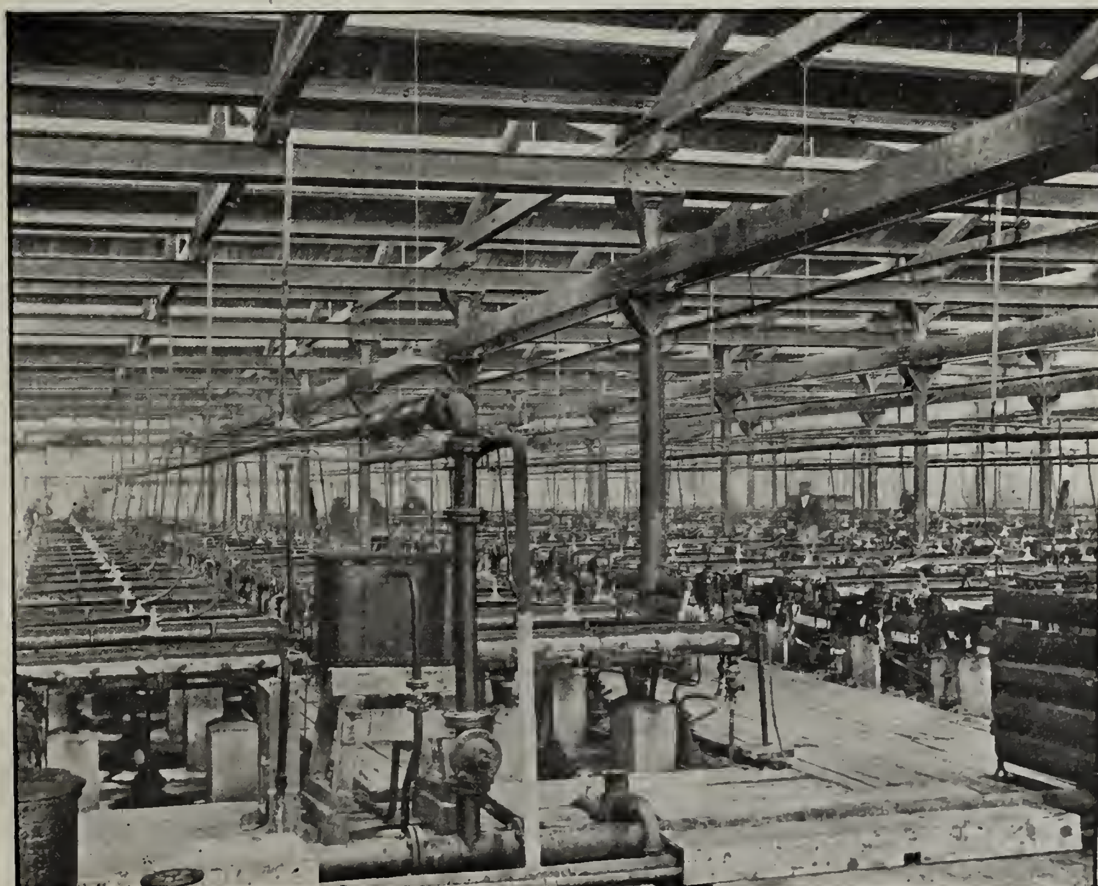
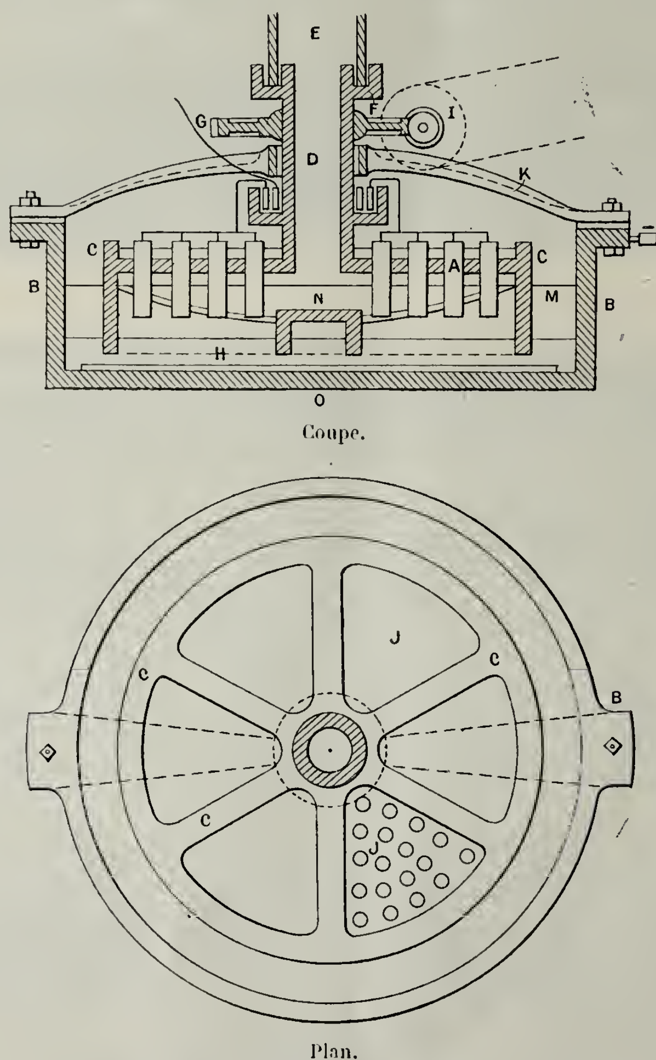


Fig. 51. — Salle d'électrolyse de l'usine d'Osternienburg (Anhalt) (Solvay et Cie).

de ces produits est de 6 000 tonnes, pour une puissance de 1 500 chevaux. Les importantes mines de lignite de la Société se trouvent à côté de l'usine et lui assurent le combustible dans de bonnes conditions économiques; la production de ce lignite est de 400 000 tonnes par an. Cette usine se trouve à 25 km de la saline de Bernburg, appartenant à la même Société, ainsi que la mine de Roschwitz, situé à 21 km et dont on extrait du sel gemme, de la carnallite (chlorure double de potassium et de magnésium), de la sylvinite (chlorure de potassium) et de la kaïnite (chlorure de potassium et sulfate de magnésium). L'ensemble de l'extraction annuelle est de 250.000 tonnes. L'Exposition de la classe 24 (section belge) renfermait également trois photographies de cette usine : une vue d'ensemble, une de la salle des machines et une de la salle des électrolyseurs (*fig.* 51) ;

4° Lissitchansk, usine du Donetz (Russie méridionale), de la Société par actions Lubimoff-Solvay et C^ie^. Cette usine en construction doit produire, au début, 6 000 tonnes par an ; elle est alimentée par la saline de Dekonofka, située à proximité, et par une houillère et une carrière de calcaire contiguës à l'usine; toutes ces exploitations appartiennent à la Société.

Appareil Rhodin. — Cet appareil figurait dans la section anglaise d'Électrochimie.




Coupe.

Plan.

Fig. 52 et 53. — Schéma de l'appareil Rhodin pour la fabrication des alcalis et du chlore.

Il repose sur l'emploi d'une cathode de mercure et sert à fabriquer directement la soude. La cuve externe en fonte BB (*fig.* 52 et 53) reçoit directement le courant (pôle négatif) et renferme

une certaine quantité de mercure H; à l'intérieur de ce récipient, se trouve une cloche en grès CC, dont les bords plongent dans le mercure ; cette cloche est munie d'une tubulure D reliée à un tube fixe E par un joint hydraulique. Cette cloche peut être mise en mouvement autour de son axe par l'intermédiaire d'une roue G, engrenée avec une autre I, animée d'un mouvement de rotation.

Le dessus de cette cloche est percé de six ouvertures J, dans lesquelles sont emboîtées autant d'anodes A, formées de cylindres de charbons réunis dans une tête en plomb, protégée de l'attaque du chlore par une couche de ciment. Cet ensemble est soutenu par une poutre K; au-dessous du collet de cette poutre se trouve une rigole, remplie de mercure, faisant corps avec le tube D, et dans laquelle plonge un anneau métallique relié aux anodes, auquel le courant est amené par une tige fixe et un second anneau intérieur au premier.

Dans le compartiment cathodique M, on fait circuler un courant d'eau et, dans le compartiment anodique N, une solution salée ; le chlore formé se dégage par les tubulures D et E et l'amalgame formé vient se décomposer au contact de la solution M. Le passage du mercure d'un compartiment dans l'autre est facilité par le mouvement de rotation de la cloche et l'action de rainures placées dans le fond de la cuve en fonte. L'hydrogène se dégage sur les parois de la cuve B.

Cet appareil repose, comme on le voit, sur le principe Castner-Kellner ; aussi un grand procès eut-il lieu entre la « Castner-Kellner Alkali C° » et la « Commercial Development Corporation », propriétaire des brevets Rhodin. L'appareil fut condamné en première instance comme contrefaçon du procédé Castner-Kellner; mais le jugement fut cassé en appel, et la « Commercial Development Corporation » gagna définitivement le procès devant la Chambre des Lords.

D'après la Compagnie propriétaire, on pourrait arriver à une concentration de 300 gr par litre, pour un rendement en quantité de 95 0/0, ce qui est tout à fait douteux.

Ce procédé n'est pas encore en exploitation en Angleterre; les droits au brevet américain ont été payés une somme considérable par « l'American Alcali C° », qui doit installer une usine à Sault-Sainte-Marie.

Il y a lieu de remarquer que, en dépit des promesses de la Société, cet appareil a du mal à fonctionner économiquement ; il ne peut en effet être construit qu'avec des dimensions restreintes, et ne peut donc donner une forte production ; il est excessivement compliqué ; enfin la force motrice nécessaire pour l'agitation est relativement considérable. Il semble douteux qu'il puisse lutter avec le procédé Castner-Kellner et surtout avec l'appareil Solvay.

Appareil Hargreaves-Bird. — Cet appareil repose sur l'emploi des cathodes-diaphragmes.

Les cathodes ne sont pas baignées par le liquide cathodique; les diaphragmes appliqués immédiatement contre les cathodes sont, de l'autre côté, en contact avec le liquide anodique. La partie cathodique du diaphragme-cathode est continuellement léchée par un courant de vapeur d'eau et d'acide carbonique ou de vapeur d'eau seule, et la solution en résultant s'écoule immédiatement; la soude ou le carbonate ainsi formés se trouvent donc immédiatement soustraits aux réactions secondaires.



Fig. 54. — Cathode-diaphragme Hargreaves-Bird.

La cathode-diaphragme, qui constitue la partie essentielle du procédé, possède la propriété d'être presque imperméable à la solution salée, tout en possédant une résistance électrique excessivement faible. Voici comment est constituée une de ces cathodes-diaphragmes (*fig.* 54).

La partie diaphragme est composée de deux couches, une en matière relativement dure et dense, et l'autre en matière poreuse ou spongieuse. La première forme une couche aussi mince que possible, en raison de sa grande résistance au courant; elle est en contact avec la cathode, formée d'une toile métallique ou d'une lame perforée. On donne à la toile métallique une plus grande surface de contact en la laminant légèrement pour aplatir les aspérités au croisement des fils. Pour construire cet ensemble, on dispose la cathode sur un châssis convenable, en

tendant la toile métallique, que l'on recouvre d'une substance poreuse, telle une feuille de papier *b*, ou, à défaut, une mince couche d'argile, de façon à empêcher la couche de ciment, que l'on mettra ensuite, d'empâter l'électrode. La couche de ciment Portland *c* est étalée d'une manière uniforme et recouverte d'une couche épaisse *b* d'un mélange d'amiante et de chaux que l'on imprègne d'une solution de silicate de sodium. Le diaphragme proprement dit est donc formé, à

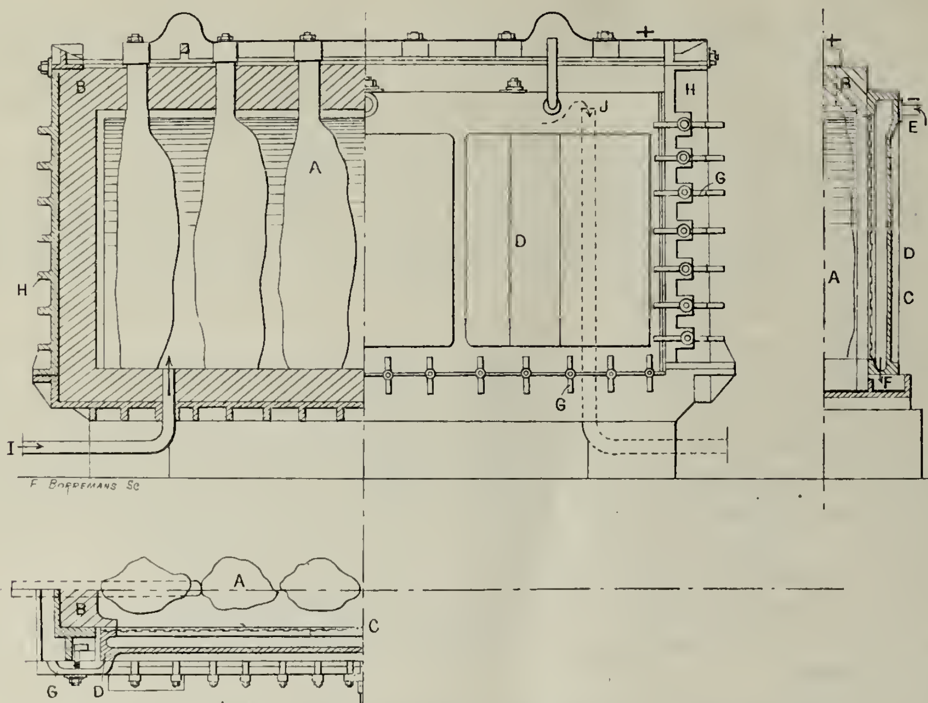



Fig. 55, 56 et 57. — Appareil Hargreaves-Bird (modèle de l'usine de Chauny).

l'extérieur, d'une couche non poreuse et doit, pour cette raison, être aussi mince que possible. La couche *b* ne doit pas subsister dans le diaphragme en fonctionnement ; il y a alors entre la couche de ciment et la toile métallique un espace capillaire rempli de liquide.

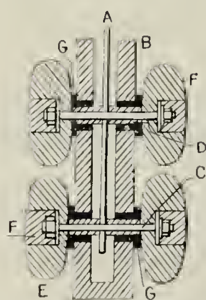


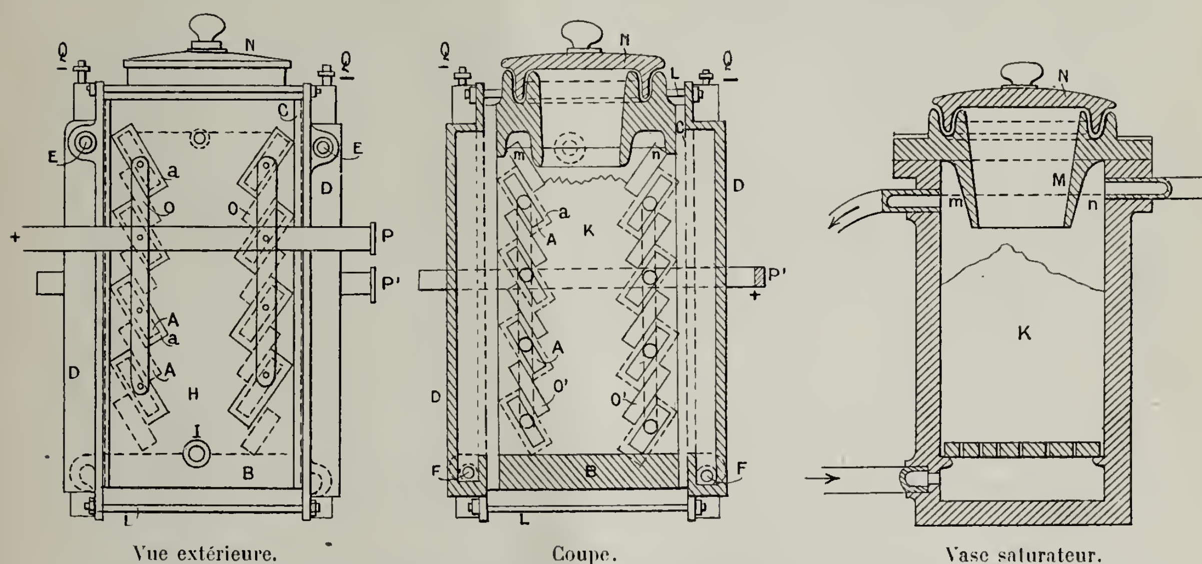

Fig. 58. — Anode composée pour le procédé Hargreaves-Bird.

L'électrolyse se fait dans des cellules fermées. L'appareil employé à Chauny est du type vertical ; il est formé (*fig.* 55, 56 et 57) d'un cadre en matière isolante et inattaquable au chlore et aux alcalis B, dans lequel sont fixées les anodes A ; de chaque côté du cadre et fermant la cellule viennent s'appliquer des cathodes-diaphragmes serrées entre des plaques de fonte D, formant extérieurement aux cathodes un espace clos, dans lequel se fait l'injection d'acide carbonique et de vapeur d'eau par le tube E ; grâce à la forme spéciale de ces plaques de fonte, l'espace, très étroit, oblige le courant gazeux à lécher toute la surface de la cathode filtrante. Le carbonate de soude formé s'écoule en F. Le serrage des plaques de fonte se fait au moyen d'étriers G, dont les têtes des boulons se trouvent fixées dans les plaques extrêmes H. L'électrolyte circule dans la partie centrale ; il entre par le bas en I et ressort par le haut en J. Le liquide épuisé passe dans un saturateur et rentre en circulation. Le chlore produit s'échappe avec cette solution et se sépare dans un appareil spécial, d'où il est dirigé soit dans les appareils d'absorption, soit dans les appareils de compression, en vue de la fabrication du chlore liquide.

Les électrodes employées seraient, paraît-il, en graphite (?). « The General Electrolytic

Parent Cº » a breveté la fabrication d'un système d'anodes permettant d'utiliser des morceaux de charbon de cornue. Cette anode composée (*fig.* 58) est constituée par un support B en matière non conductrice renfermant le conducteur A, contre lequel sont pressés, au moyen de tiges à écrous C et par l'intermédiaire de cylindres creux en charbon D, des morceaux de charbon de cornue E. Le logement de l'écrou est rempli d'une matière isolante F ; de même, les morceaux et les cylindres de charbon sont séparés du support B par des pièces en matière non conductrice G. L'intérieur du support B est également rempli d'un corps isolant, un liquide, de l'huile par exemple.

Dans l'appareil employé à l'usine de Farnworth-in-Widness (Angleterre), la disposition de l'appareil est un peu différente. Les anodes A (*fig.* 59, 60 et 61) forment une sorte de grille contre laquelle le sel vient se reposer ; on a ainsi une solution constamment saturée. Les anodes sont fixées de la façon suivante : une des extrémités traverse la plaque extrême correspondante, D par exemple, et est assujettie en coulant entre la tête d'électrode et la plaque par un




Vue extérieure. Coupe. Vase saturateur.

Fig. 59, 60 et 61. — Électrolyseur Hargreaves-Bird (modèle de l'usine de Farnworth-Widness).

joint en plomb antimonié *a* ; l'autre côté de l'électrode repose simplement dans une échancrure, ménagée dans la plaque opposée et ne la traversant pas complètement ; les électrodes sont disposées de telle façon que les têtes alternent et soient tantôt à droite, tantôt à gauche ; la partie interne des plaques extrêmes est enduite d'une épaisse couche isolante de goudron.

Les cathodes-diaphragmes C sont serrées dans les cadres E au moyen des plaques de fonte D et des tirants L. Au milieu du cadre E se trouve un dispositif M destiné à charger le sel sans perte de chlore, au moyen d'un rebord M plongeant au-dessous du niveau *mn* du liquide et formant joint hydraulique ; l'ouverture ménagée dans le cadre E est elle-même fermée par un couvercle N à joint hydraulique. Le courant est amené aux électrodes au moyen de barres d'accouplement O et O′, reliées par des barres horizontales P et P′ ; il arrive aux cathodes par l'intermédiaire des plaques de fonte D et des bornes Q.

Le liquide anodique circule d'une façon continue ; il entre en I et sort par le tuyau J, en entraînant le chlore. Le mélange de vapeur d'eau et d'anhydride carbonique entre dans la chambre cathodique par les tubes E et la solution de carbonate de soude sort par les tubes F. Au cas où le sel employé renferme des matières insolubles et des impuretés en grande quantité, le sel n'est pas introduit dans la chambre anodique et la saumure appauvrie, sortant de l'électrolyseur, est saturée dans un vase spécial à double fond et double fermeture hydraulique.

Ces appareils ont les dimensions suivantes : longueur, 3,3 m ; hauteur, 1,0 m et largeur,

0,9 m. Les diaphragmes ont 3,15 m sur 1,65 m ; leur surface utile est d'environ 9 m². Chaque appareil absorbe 2 300 ampères sous 3,6 volts, et produit par vingt-quatre heures 105 kg de carbonate de soude (calculé en $CO^3Na^2$), ce qui, d'après un rapport de Ramsay, correspond à un rendement chimique, calculé d'après la quantité d'électricité fournie à l'appareil, de 97 0/0 ; la densité de courant est de 2,5 amp : dm² de diaphragme.

Les manufactures de Saint-Gobain, Chauny et Cirey exposaient, dans la classe 87 (Produits chimiques), une réduction du modèle de cellule employée dans l'usine de Chauny et un bocal de carbonate de soude. Elle paraît d'ailleurs accorder peu d'importance à ce procédé, qui, paraît-il, ne peut fonctionner actuellement, en raison du prix du charbon. Il est à remarquer, en outre, que l'emploi d'un procédé électrolytique présente déjà des difficultés dans le cas de préparation d'alcali dont le prix, assez élevé, ne doit plus être rémunérateur lorsqu'il s'agit de carbonate de soude, dont la valeur est insignifiante.

« The General Electrolytic Parent C° », propriétaire des brevets, fit des essais à l'usine de Farnworth-in-Widness (Lancashire) et céda sa licence pour l'Angleterre à « The Electrolytic Alcali C° », qui construit actuellement une usine importante à Middlewich (Cheshire).

Appareil Outhenin-Chalandre. — Cet appareil à diaphragmes tubulaires est employé par les différentes sociétés « Volta ».

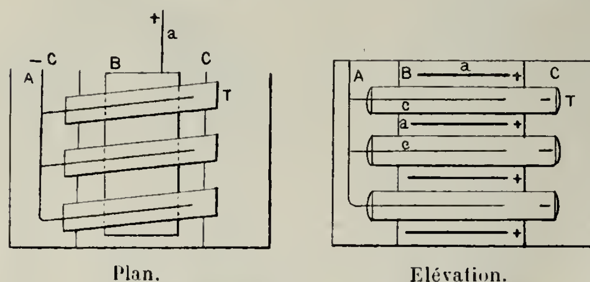



Fig. 62 et 63. — Principe de l'appareil Outhenin-Chalandre.

Il se compose, en principe, d'un récipient (*fig.* 62 et 63) divisé en trois compartiments A, B, C. Les compartiments A et C sont reliés entre eux par des tubes en faïence poreuse T, agissant comme diaphragme ; l'ensemble des compartiments A, C, et l'intérieur des tubes poreux constituent la cellule cathodique ; la partie du compartiment E extérieure aux tubes poreux constitue la cellule anodique. Les anodes sont formées de plaques de charbon A, les cathodes d'une sorte de peigne en fer *c*. Pour faciliter le dégagement d'hydrogène, les tubes T sont légèrement inclinés.

L'appareil est constitué de telle façon que les pièces en soient facilement interchangeables. Il se compose d'une cuve E (*fig.* 64, 65 et 66) dans laquelle on peut en introduire une autre à laquelle sont assujettis les diaphragmes. Cette seconde cuve est formée de quatre côtés F, F′, F″, F‴ et d'un fond G, le tout assujetti par des tirants et des boulons *a*, *b*, *c*. Les tirants correspondants aux boulons *c*, qui se trouvent dans le voisinage des anodes A, sont entourés de tubes en ébonite *d* pour éviter les courts-circuits. Les tubes en faïence renfermant les cathodes sont montés de la façon suivante : la cloison F′ est percée de trous inclinés et d'un diamètre légèrement supérieur à celui des tubes; la cloison F est percée, au contraire, de trous de diamètre un peu inférieur, mais munis de collerettes de diamètre égal à celui des trous de F′. La cathode C est munie (*fig.* 67 et 68), d'un côté, d'une échancrure permettant de la fixer à la plaque d'amenée de courant C au moyen de rondelles et d'écrous ; les boulons sont remplacés par une tige filetée *e*, rendant solidaires entre elles les cathodes d'une même rangée et, par conséquent, toutes les tiges d'amenée de courant. Ce dispositif permet un ajutage facile de toutes ces pièces. L'autre extrémité des cathodes est percée d'un trou *f*, dans lequel vient se fixer un crochet *g* terminé par une tige filetée qui, par l'intermédiaire d'un écrou à oreille *h* et d'un étrier, permet de serrer le tube contre la collerette de la paroi F. Deux anneaux de caoutchouc *j* et *j′*, en assurant le serrage, permettent de faire un joint étanche et empêchent toute communication entre les compartiments anodique et cathodique. Les anodes A sont fixées par une tête commune en plomb antimonié E qui repose dans des échancrures *h* ménagées dans les parois. Les têtes d'anode d'un appareil sont réunies entre elles au moyen d'écrous spéciaux à joint de mercure ; à cet effet, chaque tête d'anode est munie

d'une vis *l* qui traverse le couvercle du compartiment anodique E et à laquelle est fixé un écrou *m*, portant à la partie supérieure une cavité remplie de mercure. La tige d'amenée de courant I porte autant de dents J qu'il y a de séries d'anodes, chaque dent plongeant dans un des godets à mercure. On a ainsi un contact parfait et un montage facilement ajustable. Le

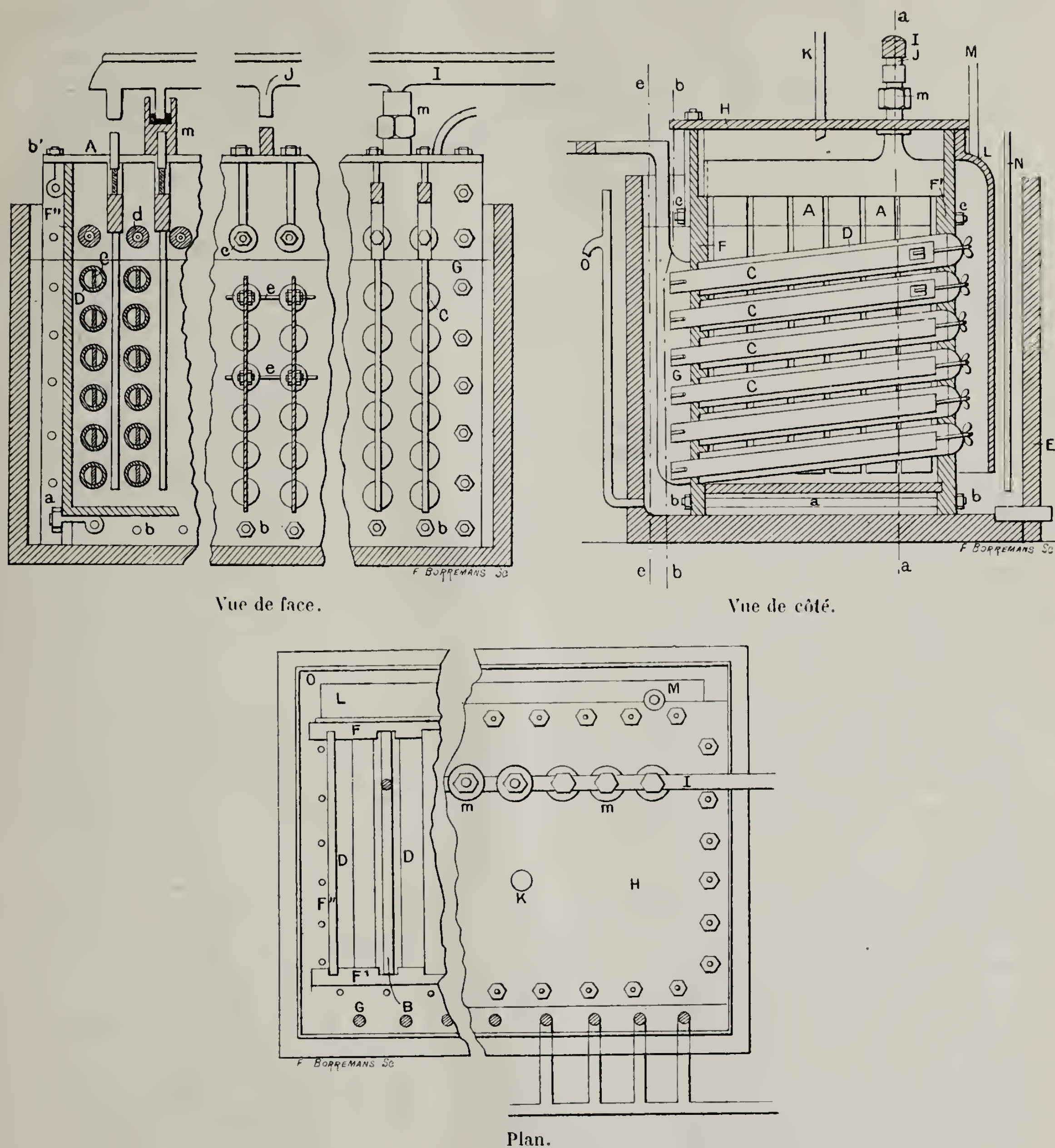
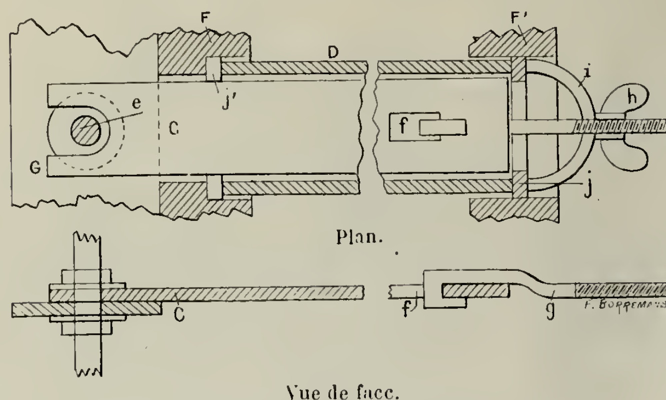



Fig. 64, 65 et 66. — Appareil Outhenin-Chalandre.

chlore formé se sépare par la tubulure K ; l'hydrogène, réuni dans une sorte de cloche L, sort de l'appareil par le tube M. On fait arriver de l'eau en N ; cette eau traverse les diaphragmes et sort, chargée d'alcali, en O. Naturellement toutes les pièces métalliques autres que les cathodes en fer ou pièces en relation avec elles sont recouvertes d'une couche de goudron pour les isoler.

Le liquide anodique circule d'une façon continue ; un dispositif spécial permet de maintenir ce liquide continuellement acide par addition d'acide chlorhydrique formé directement en com-

binant une partie du chlore et de l'hydrogène obtenus. Dans ce but, la cloche L de l'appareil précédemment décrit est remplacée par une cloche de forme différente *b* (*fig.* 69 et 70), qui repose simplement sur une cornière contenue dans la caisse de l'électrolyseur ; un dispositif spécial permet de canaliser tout l'hydrogène produit dans cette cloche ; de son extrémité supérieur part un tube *g*, qui arrive au brûleur *j*, placé dans un verre analogue aux verres de lampe, mais fermé en haut et en bas par deux plaques *l* réunies par des tiges *m*. Une toile métallique entoure le tout. A la partie supérieure du verre de lampe débouche un tube *o*, qui se raccorde avec un tuyau *p* de sortie du gaz chlore venant du compartiment anodique. Du bas de la platine inférieure *l* du brûleur part un tube *q* par lequel sort l'acide chlorhydrique formé par la combustion de l'hydrogène au contact du chlore. Ce tube *q* vient déboucher dans le tuyau de circulation du liquide anodique. La quantité d'acide chlorhydrique ainsi produite se règle facilement d'après le courant d'hydrogène employé ; on peut le rendre plus ou moins abondant au moyen d'un robinet fixé sur le tube *g*.

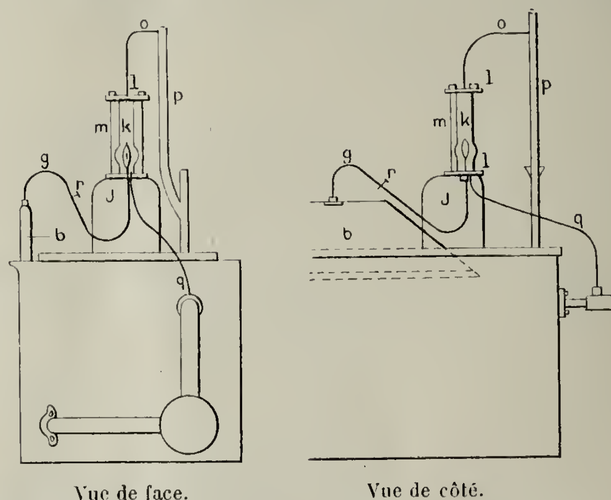



Vue de face.

FIG. 67 et 68. — Détail d'un diaphragme et d'une cathode de l'appareil Outhenin-Chalandre.

L'appareil Outhenin-Chalandre est la propriété de la « Société anonyme suisse de l'Industrie électrochimique Volta », dont le siège est à Genève et qui avait exposé, dans la section suisse de la classe 24 (Électrochimie), différents produits provenant de son usine de Chèvres, laquelle emprunte son énergie à la station municipale.

Les produits exposés étaient : du chlorure de sodium, matière première ; des lessives de soude, du chlorure de chaux à titre élevé, de l'hypochlorite de soude à titre élevé (préparé naturellement par voie indirecte) et de grands bocaux de soude caustique cristallisée en magnifiques lamelles hexagonales. Cette soude titre 75,6 0/0 d'oxyde de sodium ($Na^2O$), soit 97,5 0/0 de soude caustique (NaOH). Cette Société monte actuellement la fabrication du chlore liquide.




Vue de face. Vue de côté.

FIG. 69 et 70. — Dispositif pour la formation d'acide chlorhydrique dans l'appareil Outhenin-Chalandre.

La « Volta Suisse » a cédé licence de ses brevets à deux autres Sociétés importantes : en France, « la Volta, Société lyonnaise pour l'Industrie électrochimique », ou « Volta Lyonnaise », au capital de 6 500 000 francs et dont l'usine, située à Mont-Girod, près de Moutiers (Savoie), est en voie d'achèvement ; une collection complète de vues de cette usine, qui disposera de 15 000 chevaux se trouvait dans l'annexe de la classe 24 ; — en Italie, la « Società Italiana di Elettrochimica Volta », ou « Volta Italienne », au capital de 10 millions de lires, dont l'usine, qui disposera de 4 000 chevaux, est en construction à Bussi (Aquila).

L'Exposition collective allemande de l'Industrie chimique renfermait, dans la vitrine consacrée à l'Électrochimie, les échantillons suivants :

Chlorure de potassium brut, lessive de potasse à 50°, lessive de soude à 50°, potasse caustique à 90°, soude caustique, carbonates de potassium et de sodium, chlorure de chaux 110-120°.

D'après le rapport sur cette Exposition rédigé par M. Otto Witt, professeur de chimie industrielle à l'Université de Charlottenbourg, « la décomposition électrolytique des chlorures alcalins convient, comme le procédé Leblanc, à la fabrication des deux sortes d'alcalis ; mais, par suite du poids atomique du potassium, plus grand que celui du sodium, la séparation électrolytique est un peu plus favorable pour le potassium ; aussi, parmi le nombre des usines qui pratiquent l'électrolyse en vue d'obtenir les alcalis caustiques, une seule traite le chlorure de sodium. L'industrie électrochimique des alcalis emploie deux procédés, dont la différence repose sur le mode de séparation des produits de l'électrolyse ; la première emploie les diaphragmes poreux en ciment (procédé de la fabrique Elektron), et la seconde le mercure, c'est-à-dire le procédé Castner, rendu pratique et mis en œuvre par Solvay. Les deux procédés électrolytiques fournissent, à côté des alcalis caustiques, du chlore très pur, qui est utilisé pour fabriquer le chlorure de chaux. Actuellement déjà, en Allemagne, la plus grande quantité de ce produit est fabriquée avec le chlore électrolytique. On ne possède pas de renseignements sur la production du chlorure de chaux en Allemagne. L'exportation de ce produit, en 1898, a été de 16 813 tonnes d'une valeur de 1 765 000 marks (2 206 250 francs), et l'importation s'est élevée à 154 tonnes d'une valeur de 17 000 marks (21 250 francs). »

Plus loin, le rapporteur, fait remarquer que l'énorme quantité de soude caustique exigée par l'industrie allemande des matières colorantes nécessitait l'importation d'une certaine quantité de ce produit, mais que la production du pays suffit actuellement. Il y a lieu de noter que précisément la plus importante fabrique de produits chimiques, la « Badische Anilin-und Soda-Fabrik », est précisément celle, dont parle le rapporteur, qui fabrique actuellement sa soude par voie électrolytique.

Nous avons vu que le procédé Castner-Kellner-Solvay est exploité en Allemagne par la « Deutsche Solvay Werke Aktien Gesellschaft », dans son usine d'Osternienburg, et nous avons signalé, dans les considérations générales sur l'électrolyse des chlorures alcalins, que l'on n'était pas bien fixé sur le procédé employé dans les usines exploitant les procédés de la « Chemische Fabrik Griesheim Elektron ». Voici ce qu'écrivait, en 1896, au sujet de cette Société, le professeur Lunge, du Polytechnicum de Zurich :

« A la suite d'un brevet obtenu par Hœpfner, en 1884, trois Sociétés industrielles (Mathes et Weber, à Duisburg ; Kunheim et C^ie, à Berlin, et la Chemische Fabrik de Griesheim, à Francfort-sur-le-Mein), auxquelles s'adjoignirent deux maisons particulières, fondèrent une association pour l'étude d'un procédé de fabrication électrolytique du chlore et de la soude caustique. Les premières recherches furent faites par M. Fabian, associé de la maison Mathes et Weber. M. Fabian étant mort en 1885, la Chemische Fabrik de Griesheim fit continuer les recherches pour le compte de l'Association. Elles aboutirent à un projet d'usine, qui fut mis à exécution vers la fin de 1888. L'usine en question fut établie à Griesheim, près de l'ancienne manufacture, et disposait, dès le début, d'une force motrice de 200 chevaux. Elle fut mise en marche dans le courant de l'année 1890 et, depuis lors, n'a cessé de fonctionner à aucun moment. En 1892, elle fut même doublée.

« Ce premier succès fut décisif. M. J. Stroof, qui avait dirigé depuis 1888 l'usine de Griesheim, fut chargé, en 1892, par la Société « Chemische Fabrik Elektron », d'une nouvelle entreprise dont il est encore actuellement le directeur. En matière d'électrotechnique, on sait que l'économie de force motrice est un point d'importance capitale. Les chutes d'eau naturelles étant assez rares en Allemagne, on ne pouvait songer à établir une usine hydraulique. Mais on trouva à Bitterfeld (Saxe) un gisement de houille de qualité médiocre, il est vrai, mais d'un extrême bon marché. La construction de l'usine de Bitterfeld fut entreprise en 1893 ; sa mise en

marche date de 1894, et sa production a été doublée en 1895. Les procédés de la Société « Elektron » seront exploités sous peu dans deux usines d'Allemagne et dans deux autres en construction à l'étranger pour le compte de la même Société. M. Strooff présenta, en 1891, un rapport détaillé sur les détails de cette entreprise, dont les produits figuraient à l'Exposition de Chicago en 1893. »

En 1898, la « Chemische Fabrik Elektron » et la « Chemische Fabrik Griesheim » furent réunis en une société : « Chemische Fabrik Griesheim-Elektron », au capital de 9000000 de marks (11250000 francs) dont 4500000 francs, furent apportés par « l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft » de Berlin. Cette Société fabrique des produits chimiques de toutes sortes dans ses usines de Griesheim, Bitterfeld, Rheinfelden, Küpperstey, Spandau et Mainthal. Les trois premières usines sont plus spécialement consacrées à la fabrication des produits par voie électrochimique : alcalis caustiques, chlorure de chaux, chlore liquide, hydrogène, phosphore jaune et rouge, magnésium, sodium et peut-être chromates et permanganates. Nous avons dit que les usines de Bitterfeld et Rheinfelden, qui avaient autrefois fabriqué du chlorate de potassium, avaient dû abandonner cette fabrication. En outre, les procédés de la « Chemische Fabrik Griesheim-Elektron » pour la fabrication des alcalis sont utilisés dans un certain nombre d'usines allemandes :

Ludwigshafen, dans l'usine de la « Badische Anilin- und Soda-Fabrik », qui prépare par ce procédé la soude caustique, dont elle utilise de grandes quantités en raison de sa forte production de matières colorantes, Bitterfeld (deux usines), « Salzbergwerk Neu-Stassfurt » et Westergeln, « Consolidirte Alkaliwerke ».

Ces procédés sont également exploités par la « Société industrielle des Produits chimiques », qui avait une vitrine importante dans la classe 87 (Produits chimiques), où elle exposait des produits de toute sorte : lessive de soude, soude caustique, chlorure de chaux, hypochlorite de soude, fabriqués dans son usine de la Motte-Breuil, près de Compiègne, qui dispose d'une puissance de 3000 chevaux.

Enfin, les usines de Monthey (Suisse), 800 chevaux ; Zombkowitz (Russie), 1200 chevaux ; Slaviansk (Russie méridionale) ; Flix, sur l'Èbre (Espagne), exploitent également ces procédés.

Ajoutons, pour terminer, que la Société d'Électrochimie présentait des échantillons de soude et potasse caustiques obtenus par le procédé Hulin, dont nous reparlerons à propos de l'électrolyse par voie ignée. Cette même Société avait fait figurer à l'annexe un électrolyseur à diaphragme ressemblant à un grand élément de pile soigneusement calfeutré et qui devait fabriquer du chlore que l'on pouvait recueillir dans un ballon.

Nous donnons ci-joint un tableau donnant l'indication des usines établies en vue de la fabrication des alcalis électrolytiques. Ce tableau a été mis à jour autant que cela est possible, étant donnée la difficulté de se procurer des renseignements. Il est certain qu'il est incomplet et renferme encore quelques inexactitudes.

| USINES | SOCIÉTÉS EXPLOITANTES | PROCÉDÉS |
|---|---|---|
| | **FRANCE** | |
| Chauny | Manufacture de Saint-Gobain, Chauny et Cirey | Hargreaves-Bird |
| Mont-Girod | Volta Lyonnaise | Outhenin-Chalandre |
| La Mothe-Breuil | Société industrielle des Produits chimiques | Elektron |
| Saint-Michel-de-Maurienne | Société d'Électrochimie | Hulin (voie sèche) |
| Clavaux (Isère) | Soudières électrolytiques | Hulin (voie sèche) |
| | **BELGIQUE** | |
| Jemeppe-sur-Sambre | Solvay et Cie | Castner-Kellner-Solvay |
| | **ANGLETERRE** | |
| Winsford | Salt-Union | Greenwod (arrêtée) |
| Farnworth | General Electrolytic Parent C° | Hargreaves-Bird |
| Oldbury | Aluminium C° | Castner-Kellner |
| Weston-Point | Castner-Kellner C° | Castner-Kellner |
| Middlewich | General Electrolytic C° | Hargreaves (inachevée) |
| Saint-Helen | Electro-Chemical C° | Richardson et Holland (fermée) |
| Northwich | Brunner, Mond and C° | Castner-Kellner-Solvay |
| | **AUTRICHE** | |
| Golling près Hallein | Consortium für Electrochemische Industrie | Castner-Kellner |
| | **ALLEMAGNE** | |
| Ludwigshafen | Badische Anilin- und Soda-Fabrik | Griesheim-Elektron |
| Bitterfeld | Salzbergwerk Neu-Stassfurth | Griesheim-Elektron |
| Bitterfeld | Chemical Fabrik Elektron | Griesheim-Elektron |
| Rheinfelden | Société Elektron | » |
| Westeregeln | Consolidate Alcali-Werke | Griesheim-Elektron |
| Leopoldshall | Vereinigte chemische Fabrik | Spilker et Lœwe (fermée) |
| Osternienburg (Anhalt) | Deutsche Solvay Werke Actien Gesellschaft | Castner-Kellner-Solvay |
| Griesheim | Chemische Fabrik Elektron | Greisheim-Elektron |
| | **ÉTATS-UNIS** | |
| Berlin-Falls (Rumford-Falls) | Electro-chemical C° | Lesueur |
| Sault-Sainte-Marie | American Alcali C° | Rhodin |
| Niagara-Falls | Castner Alcali C° | Castner-Kellner |
| Niagara-Falls | » | Acker |
| Cumberland Paper Mills | S. D. Warren and C° | Diaphragme Carmichael |
| | **SUISSE** | |
| Chèvres | Volta Suisse | Outhenin-Chalandre |
| Monthey | » | Greisheim-Elektron |
| | **RUSSIE** | |
| Zomkowitz | » | Elektron |
| Slaviansk | » | Elektron |
| Lissitchansk (Donetz) | Société par actions Lubimoff-Solvay et Cie | Castner-Kellner-Solvay |
| | **ESPAGNE** | |
| Saint-Flix | » | Elektron |
| | **ITALIE** | |
| Bussi (Aquila) | Volta Italienne | Outhenin-Chalandre |

## C. — *ÉLECTROLYSE DES SOLUTIONS EN VUE DE PRÉPARER DES ACIDES, BASES, SELS, ETC.*

---

### ACIDE PERSULFURIQUE ET PERSULFATES

L'anhydride de l'acide persulfurique a été découvert, en 1878, par M. Berthelot, en faisant passer un courant d'oxygène et d'anhydride sulfureux dans son appareil à effluves (Voir p. 132). Il étudia également la formation de l'acide persulfurique dans l'électrolyse et prépara des persulfates, notamment celui de potasse, qui figurait dans l'Exposition rétrospective des Produits chimiques.

Les conditions de formation de cet acide, étudiées récemment d'une façon complète, sont les suivantes :

Le rendement décroît avec l'élévation de température ; la formation devient sensiblement nulle vers 60° ; il augmente avec la concentration jusqu'à une teneur de 700 gr d'acide sulfurique par litre environ (D = 1,395), puis décroît ensuite ; mais le rendement baisse rapidement au fur et à mesure que la solution s'enrichit en acide persulfurique ; enfin, il augmente avec la densité de courant, rapidement au début, puis lentement ensuite. Cette dernière condition est assez curieuse à étudier ; en effet, on démontre aisément en électrolyse que les oxydations se font d'autant mieux que la densité de courant anodique est plus faible. Il y a là une contradiction apparente. On l'explique par la théorie des ions.

Lorsque l'on décompose une solution étendue d'acide sulfurique, il y a dissociation en ions $\overset{+}{S}\overset{+}{O}^4$ et $\bar{H}$, $\bar{H}$ ; si, au contraire, on opère en solution concentrée, on a $S\overset{+}{O}^4H$ et $\bar{H}$. Ces ions $SO^4H$ se combinent deux à deux pour donner l'acide persulfurique $S^2O^8H^2$. Il faut donc se placer dans des conditions telles que ces ions puissent facilement se former et réagir les uns sur les autres. On y arrive, d'une part, en employant des solutions concentrées, d'autre part en augmentant la densité de courant, les ions $SO^4H$ ayant d'autant plus de chances de se combiner deux à deux qu'ils seront plus rapprochés au moment de leur libération.

L'acide persulfurique n'a pas d'intérêt par lui-même, car il est d'une conservation difficile. Il se décompose rapidement. Les persulfates sont, au contraire, d'une conservation facile à l'état sec ; leur préparation est d'ailleurs plus facile que celle de l'acide persulfurique.

Nous avons vu en effet que, dans la préparation de l'acide persulfurique, le rendement diminuait au fur et à mesure de la concentration du produit en acide persulfurique. Si, au lieu d'acide sulfurique, on électrolyse une solution de bisulfate de potassium ou d'ammonium dans l'acide sulfurique, il se forme de l'acide persulfurique, qui ne tarde pas à se précipiter à l'état de sel de potassium ou de sodium insoluble dans le milieu. Dans ces conditions, la teneur de l'électrolyse en acide persulfurique restant constante, il en sera de même du rendement, qui est alors assez élevé (80 0/0).

La préparation de l'acide persulfurique se fait avec diaphragme, en employant comme anode des tubes ou fils de platine permettant d'opérer avec une densité de courant anodique de 50 à 300 ampères par décimètre carré. L'appareil est placé dans un mélange réfrigérant ou simplement dans l'eau courante. Le vase poreux renferme de l'acide sulfurique et la cathode est formée d'un serpentin en plomb dans lequel circule un mélange réfrigérant. Naturellement, on a tout intérêt à ne pas mettre une densité de courant cathodique élevée.

On a également indiqué la préparation sans diaphragme.

L'acide persulfurique a été proposé comme oxydant; il a malheureusement l'inconvénient de donner en se dédoublant, pour une molécule de sulfate de potassium, une d'acide sulfurique, ce qui limite beaucoup son emploi.

La Société d'Électrochimie, qui a entrepris la fabrication des persulfates, exposait ceux de potassium et de sodium.

De même l'École de Physique et de Chimie industrielles exposait des persulfates de potassium et d'ammonium dans le pavillon de la Ville de Paris.

Signalons, à côté des persulfates, le percarbonate de potassium, de constitution analogue, beaucoup plus instable et qui présenterait l'avantage de donner avec le carbonate de potassium de l'acide carbonique, lequel n'est pas gênant. Malheureusement, la fabrication industrielle de ce produit, déjà difficile à obtenir au laboratoire, n'est pas encore résolue.

## CHROMATES ET BICHROMATES

On emploie deux procédés, suivant que l'on part du chromate neutre ou du ferro-chrome.

Dans le premier cas, destiné au traitement de produit de l'attaque du fer chromé naturel par les alcalis, on sépare au moyen d'un appareil à diaphragme l'alcali en excès qui était autrefois perdu à l'état de sulfate. Le charbon étant brûlé rapidement, il faut employer du platine comme anode. L'alcali se concentre dans le compartiment cathodique dont l'électrode est en nickel ou en fer. Dans le second cas, on part du chrome métallique à l'état de ferro-chrome. Enfin on a proposé de régénérer les bichromates des solutions de sels de chrome ayant servi à l'oxydation.

Il n'y avait pas d'échantillons industriels de ces produits, qui sont cependant fabriqués notamment en Allemagne. L'École de Physique et de Chimie industrielles exposait du bichromate de potassium dans le pavillon de la Ville de Paris.

## PERCHLORATES

Ces composés se forment très facilement et deviendront complètement industriels le jour où ils auront de nombreuses applications.

Il n'est pas besoin de vases poreux; on peut donc les préparer dans les appareils servant à la fabrication des chlorates. Les conditions sont un peu différentes. Tandis que la transformation du chlorure en chlorate se fait dans toutes les conditions, l'électrolyse du chlorate en milieu alcalin donne lieu surtout à une électrolyse de l'eau, le perchlorate n'étant obtenu avec de bons rendements qu'en milieu neutre ou légèrement acide. On voit donc que, dans la fabrication des chlorates, on aura tout intérêt à alcaliniser légèrement la solution pour éviter la formation des perchlorates. D'ailleurs, la température à laquelle on obtient les chlorates n'est pas favorable à la formation des perchlorates, ceux-ci ne se faisant bien qu'à froid. Ce sera même un obstacle pour la préparation du perchlorate de potassium; le chlorate est très peu soluble, le perchlorate l'est encore moins et se précipite au fur et à mesure de sa formation; il faut donc maintenir le liquide continuellement saturé en chlorate. Pour ces raisons, on a une électrolyse de l'eau assez considérable et une forte tension aux bornes. Le rendement en énergie est donc mauvais. Les chlorates de sodium et de baryum, plus solubles, donnent de meilleurs résultats; l'électrolyse de l'eau ne dépasse pas 5 0/0 et la différence de potentiel aux bornes est beaucoup plus faible que pour le sel de potassium.

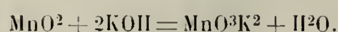
La Société d'Électrochimie (usines de Vallorbes et Saint-Michel-de-Maurienne) exposait des perchlorates de potassium et de sodium dans la classe 24.

L'École de Physique et de Chimie industrielles exposait du perchlorate de potassium (pavillon de la Ville de Paris).

### PERMANGANATE DE POTASSIUM

La préparation des permanganates peut se faire, comme celle des chromates, de deux façons différentes : par électrolyse d'une solution alcaline, en employant comme anode soluble du manganèse métallique, un alliage tel que le ferro-manganèse ou du carbure de manganèse.

On peut également électrolyser une solution de permanganate brut pour en retirer l'alcali en excès, utilisable à nouveau, alors qu'actuellement on le retire à l'état d'azotate ou même de sulfate sans valeur. La première partie de l'opération est analogue à celle du procédé entièrement chimique. Dans une lessive de potasse aussi concentrée que possible (300 kg à 50 0/0), portée à l'ébullition, on projette du bioxyde de manganèse à haut titre (100 kg), pulvérisé aussi fin que possible, et on pousse activement le feu pour accélérer l'évaporation jusqu'à dessiccation complète. Le produit est broyé après l'avoir laissé refroidir à l'abri de l'air et de l'humidité ; on obtient ainsi la « poudre verte », formée de manganate de potassium d'après l'équation :



$$MnO^2 + 2KOH = MnO^3K^2 + H^2O.$$

La poudre vert clair, grillée au contact de l'air sur des tôles portées au rouge sombre, se transforme en permanganate et devient complètement noire (poudre noire). On lessive cette poudre, qui renferme environ le quart de son poids de permanganate, de façon à avoir une lessive à 10 0/0, que l'on décante pour la soumettre à l'électrolyse dans un bac en ardoise à diaphragme. Les cathodes sont en fer et les anodes en platine. La potasse passe dans le compartiment cathodique et est utilisée pour faire la solution concentrée servant à l'attaque ; le permanganate est évaporé dans le vide et cristallise ensuite.

La Société d'Électrochimie (usines de Vallorbes et Saint-Michel-de-Maurienne) et l'Administration des Mines de Bouxviller (usine de Lanouvelle, près Nancy) exposaient du permanganate de potassium, la première dans la classe 24 (Électrochimie), la seconde dans la classe 87 (Produits chimiques). Un bocal de ce produit, fabriqué en Allemagne par la « Chemische Fabrik Griesheim-Elektron », figurait dans l'Exposition collective allemande de l'Industrie chimique.

### FERRICYANURE DE POTASSIUM

Ce produit est obtenu par l'électrolyse, dans un appareil à diaphragme, du ferrocyanure de potassium. La fabrication de ce produit a été entreprise, depuis 1886, par l'Administration des Mines de Bouxviller (Alsace).

### FABRICATION DE PRODUITS PRÉCIPITÉS

Lorsque l'on électrolyse sans diaphragme une solution d'un sel alcalin approprié (chlorure, sulfate, azotate) avec une anode soluble, l'alcali formé à la cathode précipite le sel métallique entré en solution en donnant l'hydrate du métal. Si cet hydrate est facilement réductible, une partie passe à l'état métallique et altère le produit ; mais on peut remédier à cet inconvénient par des artifices divers (augmentation de la densité de courant cathodique, entoilage de la cathode, etc.). Si, dans l'électrolyte, on fait arriver en cours d'opération un acide faible, non susceptible d'attaquer directement le métal et donnant un sel insoluble, on obtient directement le précipité. C'est ainsi, par exemple, que l'on peut obtenir la céruse (hydro-carbonate de plomb), le jaune de cadmium (sulfure de cadmium), le vert de Scheele (arsénite de cuivre), etc.

Ces procédés sont peu employés. Pour le cas de la céruse, notamment, un grand nombre de brevets ont été pris, mais ne paraissent pas donner des résultats satisfaisants. Une usine d'essai fonctionne actuellement près de Cologne.

M. Peyrusson exposait un certain nombre de produits obtenus d'après des procédés analogues, notamment de la céruse, du phosphate de cuivre et du chromate de plomb.

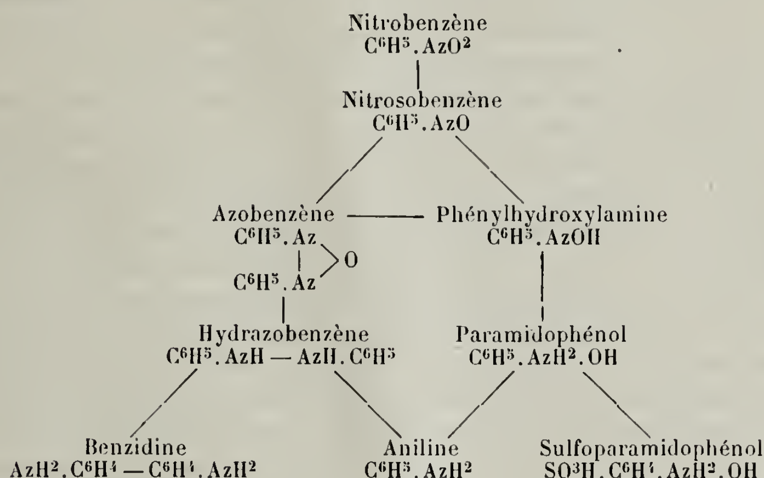
## ÉLECTROLYSE DE PRODUITS ORGANIQUES

L'électrolyse des produits organiques a donné lieu à un nombre considérable de travaux de laboratoire, bien avant même que l'on s'occupât d'électrochimie industrielle.

La préparation de produits chimiques n'a pas donné jusqu'à présent des résultats bien probants ; quelques essais ont été faits pour la fabrication de l'iodoforme, du paramidophénol, de quelques bases, etc.

De nombreux essais ont été tentés pour introduire l'électrolyse dans certaines industries, notamment le tannage des peaux et la fabrication du sucre.

La réduction des dérivés nitrés fournit une des séries les plus importantes d'opérations électrolytiques; la réaction est différente suivant que l'on opère en milieu alcalin ou en milieu acide ; alors que, dans le premier cas, on obtient, par l'intermédiaire du nitrosobenzène (dans le cas de la réduction du nitrobenzène, par exemple), de l'azobenzène, de l'hydrazobenzène et de la benzidine, dans le second on obtient, par l'intermédiaire du nitrosobenzène et de la phénylhydroxylamine, du paramidophénol et de l'aniline. La série de ces réactions est représentée par le schéma suivant :




Mais ces réactions ne sont pas exclusives : suivant que l'on opère en milieu neutre ou alcalin, on favorise une plutôt que l'autre ; le produit final obtenu renferme toujours un mélange de ces produits ou, tout au moins, les termes définitifs.

L'École de Physique et de Chimie industrielles exposait, dans le pavillon de la Ville de Paris, quelques-uns de ces produits et, notamment, du paramidophénol et de l'azobenzène, celui-ci en grandes lamelles rouge orange.

La préparation de l'iodoforme donne également de très bons résultats : c'est une des opérations électrochimiques qui se font le mieux et le plus facilement; il suffit d'électrolyser sans diaphragme une solution d'iodure de potassium dans l'alcool ou l'acétone ; par suite de la fixation d'iode, une quantité correspondante de potasse caustique se trouve mise en liberté, ce qui tend à diminuer et même arrêter la production de l'iodoforme en raison de la formation d'iodate. Il suffit, pour éviter cela, de neutraliser la potasse au fur et à mesure de sa mise en liberté au moyen d'un courant d'anhydride carbonique, en ayant soin de laisser toujours une faible alcalinité à la liqueur ; suivant la richesse de la solution en alcool, l'iodoforme se précipite en cours d'opération ou cristallise par refroidissement de la solution.

L'École de Physique et de Chimie industrielles exposait, dans le pavillon. de la Ville de Paris, de l'iodoforme en grandes lamelles hexagonales jaunes, obtenu par ce procédé.

La préparation électrolytique de l'iodoforme ne peut cependant lutter contre le procédé purement chimique, consistant à traiter une solution d'iodure de potassium dans l'alcool ou

l'acétone par les hypochlorites, en raison de ce fait que l'on peut employer pour cette préparation des solutions étendues et impures, résidu des fabriques d'iode et d'iodure de potassium.

L'électrolyse des jus sucrés en vue de leur purification a donné jusqu'à présent naissance à un grand nombre de procédés ; mais les résultats ne sont pas encore très encourageants. Le but poursuivi est, d'une part, la clarification des jus et, d'autre part, l'élimination des sels minéraux, qui, on le sait, possèdent la propriété d'empêcher la cristallisation du sucre. Les mélasses contiennent en effet, à côté de glucose, une quantité considérable de sucre ordinaire, qui est ainsi retenu par les sels minéraux.

Les principales difficultés de l'électrolyse des jus sucrés sont l'interversion, au contact des électrodes, d'une certaine quantité de sucre qui passe à l'état de glucose. L'avantage de la disparition des sels minéraux est donc compensé par cette formation de glucose qui possède également, mais à un degré moindre, il est vrai, que les sels minéraux, la propriété d'empêcher la cristallisation du sucre ordinaire. Le second inconvénient résulte de la forte tension nécessaire pour produire l'électrolyse, étant donné que la teneur des solutions en sels minéraux est déjà très faible et que le but de la purification est de les enlever le plus possible.

M. Dupont a proposé l'emploi d'un procédé qui semble résoudre le premier inconvénient. Il exposait, dans l'annexe de la classe 24, un électrolyseur de laboratoire présentant le principe de son procédé.

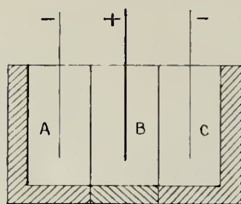


Fig. 71. — Principe de l'appareil de M. Dupont pour l'électrolyse des jus sucrés.

Cet appareil (*fig.* 71) se composait d'une cuve en verre, divisée en trois compartiments par deux cloisons poreuses en parchemin (on peut également les concevoir en toute autre matière appropriée). Les électrodes sont constituées par des plaques métalliques (platine, aluminium, zinc, etc.). La source d'électricité nécessaire est de 14 à 15 volts pour une densité de courant de 25 à 50 amp : $m^2$ d'anode.

Dans le cas de l'épuration des jus de cannes ou de betteraves, on met le jus sucré dans le compartiment interne et de l'eau dans les compartiments externes. Dans le jus plonge une anode en plomb ou en aluminium ; dans les compartiments latéraux, des cathodes en fer. Sous l'action du courant, les matières albuminoïdes se trouvent coagulées et se précipitent. Les sels solubles sont décomposés et les bases éliminées ; le jus ne renferme plus, en dehors du sucre, que des traces de matières organiques, de chaux, de magnésie et, suivant l'anode employée, un peu de sel de plomb ou d'aluminium.

Quand l'opération a été bien conduite et que la densité de courant est restée entre 25 et 50 amp : $m^2$, on retrouve tout le sucre. Avec un jus de densité 1,070, contenant environ 15 0/0 de sucre, l'opération dure une heure et demie.

## II

# ÉLECTROMÉTALLURGIE

## A. — *ÉLECTROMÉTALLURGIE PAR VOIE HUMIDE*

### CUIVRE

L'électrométallurgie du cuivre consiste principalement dans l'affinage de ce métal. L'extraction directe du minerai par voie électrolytique est en effet loin d'être résolue et un certain nombre de sociétés qui, se basant sur les résultats de l'affinage, ont monté de grandes installations pour le traitement direct du minerai ou même des mattes, après avoir perdu de grosses sommes d'argent, ont dû revenir aux procédés de métallurgie qu'elles employaient précédemment.

L'affinage du cuivre électrolytique a été proposé, en 1865, par Elkington, dont le père avait, en même temps que de Ruolz, découvert l'argenture et la dorure galvaniques. Dans le brevet pris à cette époque et qu'il compléta en 1869, il fixa la plupart des règles encore suivies aujourd'hui et mentionnait notamment l'agitation du liquide comme une condition de succès.

L'opération, simple, bon marché, a pris une extension considérable, en raison du développement de l'électricité, qui nécessitait des cuivres de plus en plus purs.

De même que de faibles quantités de carbone modifient au plus haut point les propriétés du fer, donnant, suivant le cas, des fontes ou des aciers, de même la conductivité du cuivre est modifiée d'une façon considérable par des traces de métaux étrangers, fer, antimoine, etc., et surtout arsenic. L'argent lui-même, qui est le métal le plus conducteur, introduit en faible quantité dans le cuivre, en diminue la conductivité.

Il y a lieu de faire remarquer que l'affinage du cuivre permet d'en retirer tout l'or et l'argent qu'il renferme ; la valeur de ces métaux compense en grande partie les frais de l'opération.

Les premiers essais industriels furent faits, en 1879, à Phœnixville, en utilisant deux petites dynamos de nickelage, et la première usine, installée en 1880, fut celle de la « Balbach Smelting and Refining C° », de Newark (New-Jersey).

L'industrie naissante se développe rapidement, aux États-Unis notamment et dans les autres pays, France, Angleterre, Allemagne, Russie, voire même au Caucase, au Japon et en Tasmanie.

La production des États-Unis, la plus importante et celle que l'on connaît le plus exactement, s'est accrue d'une façon considérable, d'après le tableau suivant :

| Années | Tonnes |
|---|---|
| 1880 | 500 |
| 1882 | 3 000 |
| 1889 | 20 000 |
| 1890 | 30 000 |
| 1893 | 37 500 |
| 1894 | 57 500 |
| 1895 | 87 000 |
| 1896 | 124 830 |
| 900 | 200 000 |

| | PROVENANCE du CUIVRE BRUT | PUISSANCE KILOWATTS | | NOMBRE de CUVES | | CUIVRE EN TONNES par JOUR | | ARGENT KILOGR. par JOUR | | OR EN GRAMMES par JOUR | | PUISSANCE par TONNE-JOUR en kilowatts |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1897 | 1900 | 1897 | 1900 | 1897 | 1900 | 1897 | 1900 | 1897 | 1900 | 1900 |
| Raritan Copper Works (Lewisohn Brothers). Perth-Amboy (New-Jersey). | » | | 3 000 | | 1 600 | | 150 | | 224 | | 4 760? | 20 |
| Anaconda Mining C°. Anaconda (Montana). | Anaconda (Montana) | 1 790 | 2 420 | 1 200 | 1 430 | 50 | 100 | 156 | 204 | 710 | 980 | 24,2 |
| Baltimore Copper Smelting and Rolling C°. Baltimore (Middlesex). | Anaconda | 880 | 880 | 540 | 540 | 90 | 80 | 312 | 180? | 1 420 | 764? | 11 |
| Boston and Montana Consolidated Copper and Silver Mining C°. Great Falls (Montana). | Montana | 720 | 1 200 | 288 | 600 | 20 | 60 | 34 | 110 | 117 | 252 | 20 |
| Nichols Chemical C°. Laurel Hill (New-York). | Pyrites d'Espagne, Montana et Copper Queen Mining C°, Arizona | 600 | 800 | 90 | 400 | 40 | 60 | 85? | 28 | 480 | 952 | 13,3 |
| Guggenheim Smelting and Refining C°. Newark (New-Jersey). | Mexique et Colorado | 400 | 540 | 360 | 390 | 27 | 50 | 284 | 560 | 1 700 | 4 900? | 10,8 |
| Balbach Smelting and Refining C°. Newark (New-Jersey). | Orford Copper C°, Canada et divers | 240? | 600 | 432 | 432 | 30 | 30 | 65 | 70 | 368 | 364 | 20 |
| Bridgeport Copper C°. Bridgeport (Connecticut). | Parrot Silver and Copper C° de Butte (Montana) | 180? | 600 | 432 | 432 | 30 | 30 | 51 | 38 | 170 | 168 | 20 |
| Irvington Smelting and Refining C°. Irvingtong (New-Jersey). | Montana et divers | 120 | 160 | 96 | 90 | 9 | 9 | 14 | 20 | 28 | 56 | 17,7 |
| Chicago Copper Refining C°. Blue Island (Illinois). | Montana | 128 | 128 | 165 | 200 | 5 | 5 | 11 | 3 | 28 | 70 | 25,6 |
| Buffalo Copper Works. Buffalo (New-York). | Lac Supérieur | | 200 | | 100 | | 5 | | 3 | | 86? | 40 |
| New England Electrolytic Copper C°. Central-Falls (Rhode-Island). | Montana | 490 | | 560 | | 40 | | 68 | | 227 | | » |
| Omaha Grant Smelting C°. Omaha (Nebraska). | Colorado | 6 | | 48 | | 1 | | 8 | | 57 | | » |
| | | | | | | 342 | 579 | 1 088 | 1 340 | 5 305 | 13 346 | |
| | | | | | | tonnes | | kilogrammes | | grammes | | |

En 1889, la production du cuivre électrolytique représentait le quart du cuivre raffiné total ; en 1890, le tiers et, en 1900, la moitié.

La production journalière est donc de près de 550 tonnes.

Le traitement des boues fournit par jour 1 340 kg d'argent, soit annuellement 500 tonnes, le tiers de la production de l'Amérique entière ; la production annuelle de l'or est de 5 tonnes.

Comme nous l'avons vu, cette industrie s'est également développée dans beaucoup d'autres pays, mais dans de moins grandes proportions. La production mondiale du cuivre en 1900 a été de 270 000 tonnes

Le tableau ci-contre donne, d'après deux mémoires de M. Titus Ulke, parus en 1897 et 1901, la production des usines américaines en 1897 et 1900. On y remarque un certain nombre de chiffres incompatibles pouvant provenir de ce que quelques usines, ne fonctionnant pas à pleine charge, ont changé la provenance de leurs minerais ou leur mode de fabrication. Les usines américaines sont au nombre de onze et l'on est frappé de la puissance colossale de quelques-unes.

Il est intéressant de noter que l'accroissement superficiel des usines n'a pas été en rapport avec l'accroissement de la production ; loin de là. On conçoit en effet que des usines qui, comme en Amérique, traitent jusqu'à 100 et 150 tonnes de cuivre par jour, doivent avoir un stock énorme, lequel représente un capital immobilisé considérable. Il y a une douzaine d'années, ce stock représentait jusqu'à 75 et même 100 fois la production journalière. Grâce aux progrès réalisés dans le traitement et principalement en raison de l'augmentation considérable de la densité de courant, on a pu réduire ce stock à 15 ou 20 fois la production journalière, ce qui, pour les grandes usines, représente un chiffre de tonnes encore respectable.

En même temps que l'on cherchait ainsi à améliorer la fabrication, on a réussi, dans certains cas, à façonner directement des tubes, des lames, etc , supprimant ainsi la main-d'œuvre résultant de cette opération et créant entre l'affinage proprement dit et la galvanoplastie, en honneur depuis très longtemps déjà, une industrie intermédiaire, la galvanostégie, qui a pris un grand développement au cours de ces dernières années. Quant à la galvanoplastie, qui peut également se diviser en deux parties : la galvanoplastie proprement dite ou reproduction d'un objet, au moyen d'un moule, d'un négatif que l'on a obtenu, et le cuivrage électrolytique, elle ne s'est pas développée aussi considérablement.

Affinage du cuivre. — *Principe de la méthode.* — Les trois industries dont nous venons de parler procèdent de la même façon, au point de vue général de l'opération. On électrolyse une solution acide de sulfate de cuivre dans des conditions spéciales, de telle façon que le cuivre pur se dépose à la cathode, tandis que les impuretés restent à l'état solide, si les métaux ne sont pas solubles dans les conditions de l'opération ou demeurent en solution dans le bain s'ils sont solubles. Le bain s'enrichit peu à peu en matières étrangères qui modifient ses propriétés ; il faut donc de temps en temps le régénérer en enlevant ces impuretés ; c'est sur ce point que reposent tous les secrets de fabrication des usines. Naturellement, dans le cas de la galvanoplastie, les installations sont beaucoup trop réduites pour entreprendre cette régénération ; aussi ont-elles intérêt à utiliser des anodes en cuivre affiné. On renouvelle le bain lorsqu'il est par trop souillé, on se contente de faire cristalliser le sulfate de cuivre qui, même à l'état impur, est encore d'une vente très facile.

Dans l'affinage proprement dit, les usines opèrent d'une façon à peu près analogue ; de simples dispositions de détail modifient leur manière de procéder. Ces dispositions de détail reposent sur la dimension des appareils, des électrodes, la concentration de l'électrolyte, la densité de courant ; elles sont, en général, réglées par la composition du cuivre brut, qui peut être très variable suivant la provenance et le mode de fabrication.

*Appareils.* — Les cuves sont généralement en bois, garnies de plomb ou vernies sur leur face interne. Elles ont une contenance de 3 à 5 m$^3$, quelquefois plus.

Les dimensions des électrodes sont très variables ; en général l'anode et la cathode ont même surface ; la largeur varie de 20 à 80 cm et la longueur de 0,60 m à 1,40 m. On ne dépasse guère ces dimensions, les électrodes trop grandes étant d'un maniement difficile.

Les anodes sont le plus souvent en cuivre fondu ; leur épaisseur est de 2 cm environ, quelquefois plus, jusqu'à 5 dans les petites dimensions ; les anodes épaisses ont l'avantage de donner un déchet relatif moins considérable ; par contre, elles immobilisent une quantité de métal beaucoup plus grande. Quelquefois les anodes sont laminées, comme à la Baltimore Smelting and Rolling C°, de Baltimore, qui traite ainsi environ le tiers de ses anodes ; cette opération exige des cuivres déjà purs permettant d'obtenir des plaques de 7 à 8 mm, de sorte que le stock est beaucoup plus faible.

Dans les plaques coulées, on ménage généralement des oreilles pour les suspendre.

Les cathodes sont naturellement en cuivre électrolytique pur ; elles peuvent être laminées ; mais, comme il est assez difficile d'avoir de grandes lames régulières assez minces, on les prépare en déposant une couche de cuivre sur une feuille de papier ou de métal que l'on recouvre d'un enduit conducteur empêchant l'adhérence de la feuille déposée (plombagine seule ou mélangée à de la vaseline ou de la paraffine). Les feuilles obtenues ont 0,1 mm d'épaisseur.

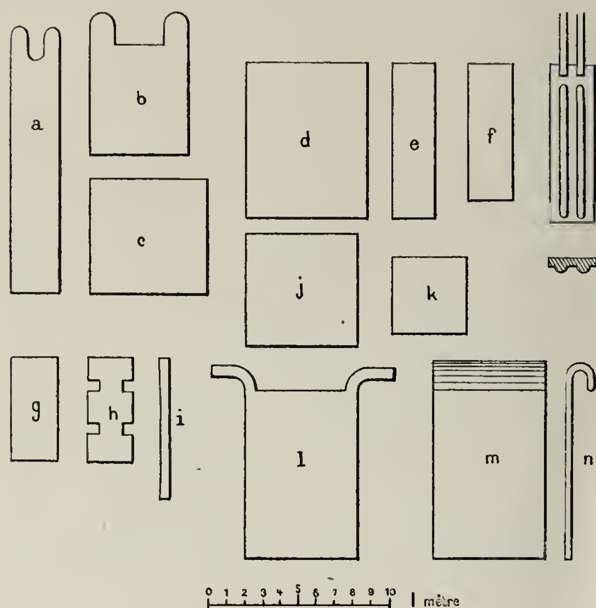



Fig. 72 à 87. — Différents types d'électrodes employés dans l'affinage des métaux avec leurs dimensions proportionnelles.

*a*. Anode. Nichols Chemical C° ; — *b* et *c*. Anodes. Copper Queen consolidated Mining C° ; — *d* et *e*. Cathodes. Compagnie française des Métaux ; — *f* et *g* Cathode. Fonderies et Laminoirs de Biache-S^t-Waast ; — *g* et *h*. Cathodes. Usine J.-K. Nickolaeff ; — *i*. Cathode. Usine de Zyrianowsk ; — *j* et *k*. Cathodes. Kédabeck ; — *l*. Cathode en nickel. Orford Copper C° ; — *m*. Anode en nickel. Orford Copper C° ; — *n*. Anode en nickel (vue de côté). Orford Copper C° ; — *o* et *p*. Anodes. Société des Cuivres de France.

Nous donnons (*fig*. 72 à 87) les différents types d'électrodes employés dans l'affinage des métaux.

Les électrodes sont suspendues le plus simplement possible ; lorsqu'elles n'ont pas d'oreilles, on emploie des barres transversales et des crochets passant dans des trous ménagés à leur partie supérieure ou des tiges directement fixées aux cathodes ou faisant corps avec les anodes.

Le courant est amené au moyen de barres de cuivre courant sur les côtés des cuves ; bien que la densité de courant soit assez faible, en raison de la dimension des cuves et du nombre des électrodes, l'intensité est très considérable, aussi les conducteurs ont-ils jusqu'à 5 cm de diamètre, d'autant plus que, en raison de la faible tension employée dans les cuves, la perte en ligne relative est considérable. On calcule ces conducteurs à raison de 0,4 à 2 amp : mm² de section.

Les barres auxquelles sont suspendues les anodes et les cathodes ou les oreilles des électrodes appuient seulement sur ces conducteurs et, en vertu du poids des électrodes, le contact est parfait. Ces conducteurs sont placés sur les parois des cuves montées en tension, les cathodes reposant sur une des extrémités des conducteurs et les anodes sur l'autre. Pour faciliter le montage, ils sont incurvés de telle façon que les parties cathodiques soient intérieures et plus basses que les parties anodiques ou réciproquement.

La distance entre les électrodes varie de 5 à 10 cm. On ne peut descendre au-dessous, car les parties insolubles, les boues, se détachant des anodes et tombant, pourraient s'accrocher aux aspérités des cathodes et être emprisonnées par le dépôt de cuivre.

Quelquefois, surtout lorsque ces boues sont abondantes, l'anode est emprisonnée dans une sorte de diaphragme formé d'un sac de toile qui retient les boues et les empêche de venir salir le métal pur.

Étant donnée la faible tension nécessaire, on a pensé utiliser les électrodes bipolaires, se

dissolvant d'un côté et augmentant de l'autre ; mais ce procédé donne de mauvais résultats ; ou il reste du cuivre impur, ou le cuivre raffiné se dissout à nouveau. La difficulté a été tournée aux mines d'Anaconda, où l'on a essayé des électrodes bipolaires formées en réunissant, au moyen de boulons, l'anode et la cathode qu'il n'est pas nécessaire de séparer par un isolant.

*Electrolyte. — Densité de courant.* — Il est formé d'une solution acide de sulfate de cuivre, dont la composition varie suivant la nature du cuivre brut. Cette composition oscille dans les limites suivantes :

| | |
|---|---|
| Eau | 70 à 80 parties |
| Acide sulfurique | 8 à 10 — |
| Sulfate de cuivre | 15 à 25 — |

La température du bain peut varier de 25 à 35°, mais ne doit pas s'écarter de ces limites.

La densité de courant est également variable suivant les usines et dépend de la pureté du métal brut ; plus il est pur, plus la densité de courant peut être élevée. Mais, outre qu'une densité de courant élevée favorise le dépôt d'autres métaux, en même temps que celle du cuivre, elle facilite le dépôt d'oxydule de cuivre, qui donne au métal une couleur rouge spéciale ; enfin, plus la densité de courant est élevée, plus le dépôt est irrégulier et peu adhérent. Il acquiert même une consistance grenue et se détache sous la poussée du doigt.

Au contraire, si le dépôt est fait avec une bonne densité de courant, il est régulier, d'une belle couleur rose, homogène et compact.

Au point de vue commercial, la densité de courant a son importance. Nous avons vu, en effet, que le stock de cuivre immobilisé pendant l'affinage électrolytique est considérable ; or la rapidité du dépôt dépend de la densité du courant ; on peut calculer ce dépôt d'après la formule :

$$e = \frac{386 \times N \times D_c \times M}{D \times n} \times 10^{-7};$$

$e$, épaisseur du dépôt, en centimètres ;

$D_c$, densité de courant en ampères par mètre carré ;

M, poids atomique du métal ;

N, nombre d'heures ;

$n$, nombre de valences rompues ;

D, densité du métal.

Dans le début de l'industrie l'affinage du cuivre, la densité de courant était de 20 ampères par mètre carré ; d'après la formule ci-dessus, il fallait donc environ cinq mois pour arriver à une épaisseur de 1 cm ; actuellement on travaille de 70 à 150 et même 200 amp : m², ce qui correspond à une durée de quarante à vingt et quinze jours par centimètre d'épaisseur.

Il y a lieu de remarquer, enfin, que plus la densité de courant est élevée, plus la tension aux bornes sera considérable et, en conséquence, le rendement mauvais. On fait donc choix d'une densité de courant moyenne conciliant les trois facteurs : vitesse de dépôt, pureté et qualités du métal, rendement.

*Action des métaux étrangers.* — Kiliani a étudié l'action sur la marche de l'électrolyse des impuretés contenues dans le cuivre brut. Voici les grandes lignes de son travail :

L'or, l'argent et le platine se déposent simplement dans les boues et n'ont aucune action.

L'étain, l'antimoine et le bismuth se dissolvent dans le bain et sont rapidement transformés en sels basiques qui se déposent dans les boues ; s'ils sont en grande quantité, ils passent dès le début à cet état. Leur action consiste donc à appauvrir le bain en cuivre, puisqu'une partie du cuivre équivalente à celle de ces métaux précipités se déposera à la cathode.

En outre, il y aura enrichissement d'une partie d'acide équivalente aux oxydes ou sels basiques précipités.

L'arsenic se dissout dans le bain à l'état d'acide arsénique. Il y a donc appauvrissement de la liqueur en cuivre et enrichissement en acide sulfurique libre d'une quantité équivalente à celle de l'arsenic.

Le plomb donne du sulfate de plomb insoluble ; il enlève donc du sulfate de cuivre à l'électrolyte.

Le fer, le zinc, le nickel et le cobalt se dissolvent dans le bain en quantité équivalente à celle du cuivre déposé; ils ne changent pas la teneur moléculaire en sels, une quantité de sulfate de cuivre étant remplacée par la quantité équivalente de sulfate de ces métaux. En outre, ces métaux peuvent se dissoudre par simple action de l'acide sulfurique. De ce fait, ils diminuent l'acidité et augmentent la quantité de sels minéraux en solution.

Tous ces métaux ont donc pour effet d'appauvrir la solution en cuivre, quelques-uns appauvrissent en acide et d'autres enrichissent, ce dernier effet étant le plus considérable.

Ces actions sont contre-balancées par les suivantes :

Le cuivre renferme généralement de l'oxydule de cuivre qui, se dissolvant, enrichit la solution en cuivre et l'appauvrit en acide. Le cuivre lui-même se dissout dans l'acide en donnant du sulfate cuivreux.

Au contact de l'air, le sulfate cuivreux se transforme en sulfate de cuivre ordinaire. L'action de l'air favorise la seconde réaction; c'est une raison pour laquelle les anodes se coupent à la surface du liquide. Les cathodes elles-mêmes sont légèrement attaquées.

Pour toutes ces raisons, la diminution de l'anode, même en tenant compte uniquement du cuivre, sera plus grande que l'augmentation de la cathode, cette dernière pouvant être plus faible que ne l'indique la loi de Faraday.

On cherche, dans certains cas, à augmenter cette solubilité des anodes en oxydant légèrement le cuivre avant de le couler.

Dans une installation importante, il sera donc nécessaire de suivre journellement la constitution de l'électrolyte : densité, analyse, dosage, etc.

*Circulation de l'électrolyte.* — Une circulation très active de l'électrolyte est nécessaire pour plusieurs raisons :

Il faut oxyder le sulfate cuivreux formé en cours d'opération.

Sous ces influences diverses, le liquide change de densité : dissolution du cuivre plus rapide en certains endroits, précipitation plus rapide en d'autres, influence de l'air à la surface, changement de composition du bain par suite de la dissolution des métaux étrangers, etc.

Pour ces raisons, le bain devient de plus en plus résistant lorsqu'il n'y a pas agitation, circulation et même brassage énergique au contact de l'air.

Plus la circulation de l'électrolyte est rapide, plus le dépôt de cuivre est beau et plus on peut augmenter la densité du courant et, par conséquent, la vitesse du dépôt, ce qui a son importance, comme nous l'avons vu.

Lorsqu'un bain n'est pas agité, il se décolore à la surface ; cette partie supérieure s'appauvrit en cuivre, tandis que la concentration augmente à la partie inférieure de l'électrolyseur, au point que le sulfate de cuivre cristallise sur les parois et les électrodes, ce qui est mauvais pour la pureté du métal.

La circulation est obtenue en disposant les bacs en gradins et en remontant le liquide du dernier au premier au moyen d'une pompe. On peut également produire l'agitation par un courant d'air insufflé dans les cuves ; mais ce procédé a l'inconvénient d'agiter les boues qui se déposent sur les cathodes. Pour y remédier, on dispose une cuvette sous les électrodes pour recueillir les boues et l'on place dans les bains un tube coudé, dont une des branches, percée de trous, se trouve sous la cuvette et l'autre arrive le long de la paroi verticale au niveau du liquide. En insufflant de l'air dans cette partie du tube, le liquide s'échappe par-dessus ou par l'intermédiaire d'un autre tube horizontal percé de trous. La circulation est donc continue. Ce système

est employé notamment par la Guggenheim Smelting and Refining C° de Perth-Amboy (États-Unis).

*Dépense d'énergie.* — Dans l'électrolyse avec anode soluble, il n'y a pas de travail électrochimique proprement dit, la réaction produite à l'anode étant détruite par celle de la cathode. Il y a un simple transport du métal du pôle positif au pôle négatif. L'électrolyseur absorbera donc uniquement le travail nécessaire à ce transport, c'est-à-dire le travail nécessaire pour vaincre la résistance du bain. L'électrolyte est assez conducteur ; sa résistivité varie, en général, de 20 à 25 ohms-centimètre. La tension aux bornes sera de ce fait excessivement faible. Pratiquement, elle est, en moyenne, de 0,3 volt, quelquefois moins, 0,25 volt, quelquefois plus, 0,35, 0,40, etc. Naturellement elle variera suivant la densité de courant utilisé.

En admettant que la quantité de cuivre déposé soit théorique et la tension de 0,25 volt, on trouve que :

| | |
|---|---|
| 1 watt-heure donne | 4,72 gr de cuivre |
| 1 kilowatt-heure donne | 4,72 kg de cuivre |
| 1 kilowatt-jour | 113,5 — |

Pour produire 1 tonne par jour, il faudra donc une puissance de 8,8 kilowatts ; en admettant une tension de 0,3 volt, il faudra 10,6 kilowatts et, pour 0,35, il en faudra 12,3.

Il y a lieu de remarquer, en outre, que la quantité de cuivre déposée n'est pas théorique. Les valeurs figurant au tableau de la page 70 correspondent à peu près à 20 kilowatts par tonne-jour ; les services accessoires étant probablement compris dans cette valeur.

Certains chiffres diffèrent un peu, probablement par suite de ce que les usines ne travaillent pas à pleine charge pour les valeurs trop élevées (40) ou d'erreurs dans l'estimation de la puissance pour les valeurs trop faibles Les différences peuvent également dépendre de la densité de courant et, par conséquent, de la tension employée.

*Régénération de l'électrolyte.* — La solution de sulfate de cuivre ne sert pas indéfiniment ; nous avons vu en effet, qu'elle se chargeait de sulfate de fer, zinc, nickel, etc..., aux dépens du sulfate de cuivre. La solution se charge également d'acide arsénique ; ce dernier est le plus gênant, car il augmente considérablement la résistivité du bain, d'où élévation de différence de potentiel aux bornes ; de plus, l'arsenic risque à ce moment de se déposer avec le cuivre.

Naturellement, le procédé de purification varie suivant la nature des impuretés. Généralement la solution est filtrée sur de l'oxyde de cuivre qui précipite l'arsenic, le bismuth, l'antimoine et neutralise la liqueur ; on délaye ensuite de l'oxyde de fer fraîchement précipité et l'on fait passer un courant d'air qui précipite tout le fer à l'état de sulfate basique de sesquioxyde. Le nickel ne peut être enlevé. D'ailleurs, si le produit traité renferme beaucoup de ce métal, il peut être traité par électrolyse, comme nous le verrons plus loin.

La solution purifiée est à nouveau acidifiée soit par électrolyse avec anodes insolubles, soit par addition d'acide sulfurique.

Lorsque les impuretés du cuivre brut ne sont pas très grandes et que, par conséquent, la purification ne porte que sur de faibles quantités d'électrolyte, on se contente de faire cristalliser le sulfate de cuivre, les premiers cristaux rentrent en fabrication, les autres sont vendus tels quels. C'est généralement ce qui se passe pour les usines françaises, le sulfate de cuivre ayant une assez grande valeur ; il est vendu aux viticulteurs. L'inconvénient est que ce produit renferme de l'arsenic, mais, jusqu'à présent, cela n'a présenté aucun inconvénient.

*Traitement des boues.* — Suivant le cuivre brut employé, la quantité de boues anodiques est plus ou moins considérable ; elle peut atteindre jusqu'à 2 et 3 0/0 pour des cuivres très impurs. Elles sont constituées principalement par du cuivre à l'état d'oxyde cuivreux et de l'argent métallique. La quantité d'oxyde cuivreux, et, par conséquent, la quantité totale des boues, est d'autant plus abondante que la densité de courant anodique est plus faible. Le reste est formé de sels basiques d'étain, antimoine, bismuth, de sulfate de plomb, de sulfures, etc...

La teneur moyenne des boues est la suivante :

| | |
|---|---|
| Cuivre | 15 à 30 0/0 |
| Argent | 45 à 50 0/0 |
| Arsenic<br>Antimoine<br>Tellure<br>Bismuth<br>Plomb | 20 à 25 0/0 |

Le traitement adopté est le suivant : les boues sont traitées, pendant deux ou trois heures, dans une cuve en bois doublée de plomb, par de l'acide sulfurique dilué (1 tonne d'acide pour 4 d'eau); on chauffe par un courant de vapeur d'eau et on insuffle un violent courant d'air ; de la sorte l'oxyde cuivreux se transforme en sulfate cuivrique. De même l'arsenic et l'antimoine se dissolvent avec la majeure partie des impuretés. Il reste dans les boues tout l'or et l'argent, du sulfate de plomb, du tellure et un peu de bismuth et d'antimoine.

Les boues, lavées et séchées, sont fondues sur la sole d'un four d'affinage. On obtient une scorie renfermant environ 20 0/0 de plomb et 10 0/0 d'antimoine avec un peu d'or et d'argent, la scorie est coulée, brisée après refroidissement et fondue avec du plomb. Celui-ci prend les métaux précieux; on peut l'enrichir jusqu'à 60 0/0 d'argent par des traitements successifs.

Sur le métal fondu débarrassé de sa scorie, on projette un peu de salpêtre, il se forme une nouvelle scorie très riche en tellure au point que, seulement dans l'usine de la « Baltimore Electric Refining C° », où ce traitement est effectué, on pourrait recueillir par jour 3 kg de tellure, si ce produit avait un emploi. Les métaux précieux sont ensuite coulés et raffinés par électrolyse, comme nous le verrons.

Le cuivre dissous dans l'acide sulfurique est précipité par du fer, coulé en lingot et vendu comme cuivre impur ; on peut également l'affiner.

A l'usine Guggenheim de Perth-Amboy, on emploie un traitement analogue ; mais, après l'attaque sulfurique, les boues séchées sont directement fondues avec le plomb, qui enlève les métaux précieux et est ensuite coupellé.

L'usine de l' « Anaconda Mining C° » utilise le procédé Thofern, consistant à employer les boues comme anodes dans un bain de chlorure ferrique avec un courant excessivement faible ; tous les métaux se dissolvent, sauf l'or et l'argent. On coupelle ensuite et on traite par électrolyse.

A côté de ces procédés mi-partie par voie sèche, mi-partie par voie humide, on utilise quelquefois uniquement la voie sèche.

Produits exposés. — Un grand nombre de fabriques avaient exposé ; mais, en général, les expositions étaient peu intéressantes ; elles se composaient uniquement de cathodes et d'anodes. Une seule usine, celle de Zyrianowsk (Russie), faisait figurer les plans de son installation.

La Compagnie française des Métaux exposait en différents endroits : Mines et Métallurgie, Électricité, Électrochimie, un grand nombre de cathodes de 65 × 80 et 20 × 80 (*fig.* 72-87, *d* et *e*) ; des lingots affinés provenant de la fonte de plaques électrolytiques et des cassures sur lingots affinés, des bocaux de sulfate de cuivre provenant de l'atelier d'électrolyse et un lingot d'argent provenant du traitement des boues. L'affinage électrolytique a lieu dans les usines de Fromelennes et de Flohival, près de Givet, et le traitement des boues dans l'usine de Saint-Denis. La production du cuivre est de 2 500 tonnes par an (environ 7 tonnes par jour).

La Société des Cuivres de France fabrique, dans son usine d'Eguilles, par Sorgues (Vaucluse), du cuivre argentifère tenant 97 0/0 de cuivre. Ce cuivre est coulé en anodes de 85 cm de hauteur, 25 de largeur et 2 d'épaisseur (*fig.* 72-87, *o* et *p*). Deux pattes, introduites pendant la coulée, permettent de suspendre les anodes. La Société exposait un grand nombre de ces anodes, des cathodes et les métaux précieux (or et argent) correspondants ; des boues, du sulfate cuivreux et du sulfate cuivrique.

L'usine produit annuellement 600 tonnes de cuivre et traite directement ses boues, qui donnent 3 tonnes d'argent et 50 kilogrammes d'or.

Les Fonderies et Laminoirs de Biache-Saint-Waast (Pas-de-Calais) exposaient des cathodes de 20 × 70 de 15 mm d'épaisseur (*fig.* 72-87, *f*) ; l'usine traite également ses boues.

La Russie était représentée par trois sociétés : l'usine de Zyrianowsk (Altaï du Sud), qui, outre les plans de son installation, exposait ses minerais, ses produits et des cathodes de 4 × 80 cm (*fig.* 72-87, *i*), et l'usine de J.-K. Nikolaeff, de Nijni-Novogorod, qui utilise deux séries de cathodes (*fig.* 72-87, *g* et *h*) dont les unes présentent des échancrures, exposaient dans le Palais des Mines et de la Métallurgie, tandis que l'usine de Kedabeck, près de Kalakend (Caucase), faisait figurer dans l'Exposition de l'Asie russe ses minerais et des échantillons divers de cuivre affiné. Cette usine a été montée par la maison Siemens et Halske, qui en est en partie propriétaire, et exposait également du cuivre affiné dans la Section russe du Palais de l'Électricité.

La Nichols Chemical C° (Voir p. 70) avait une exposition très importante dans la Section américaine des Mines et de la Métallurgie ; elle exposait des anodes de 140 × 25, des cathodes, des lingots, barres, fils, etc. Les produits résultant de 15 tonnes de minerai de la « Copper Queen Consolidated Mining C° », de Bibee (Arizona), soit une tonne de cuivre, 380 gr d'argent et 8 gr d'or, y figuraient en nature. Cette usine produit par jour 60 tonnes de cuivre électrolytique.

L'usine de Beszterczebanya (Hongrie) exposait également ; elle produit près de 110 tonnes par an.

Galvanostégie. — Le cuivre électrolytique, tel qu'il est livré par les usines, se présente en plaques de texture plus ou moins grenue, cristalline, à surface irrégulière, couverte de boutons, d'aspérités et même de cristaux ; ces plaques ne peuvent être laminées directement et, à plus forte raison, transformées en tubes, fils, etc... Il est nécessaire de les fondre et de les couler en lingots de formes diverses, suivant l'usage auquel le métal est destiné. Il y a ainsi une manipulation assez grande que l'on a cherché à éviter. Il fallait pour cela trouver un procédé permettant d'avoir un métal de surface absolument lisse et de texture homogène non cristalline.

Parmi les procédés ayant donné jusqu'à présent les meilleurs résultats, il importe de citer : le procédé Elmore, dans lequel la structure cristalline, qui tend à se faire pendant le dépôt du cuivre, est transformée en structure fibreuse au moyen de frottoirs en agate animés d'un mouvement de va-et-vient le long de la cathode ; le procédé Cowper-Coles, dans lequel le même résultat est obtenu en animant la cathode d'un mouvement de rotation extrêmement rapide ; le procédé Dumoulin, etc...

*Procédé Elmore.* — Le but du procédé consiste, comme nous l'avons vu, à transformer la

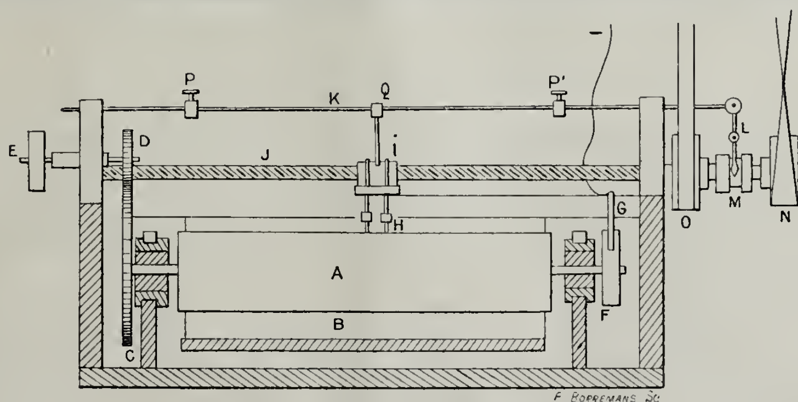



Fig. 88. — Coupe de l'appareil Elmore.

structure cristalline, du cuivre électrolytique en structure fibreuse. Toute l'opération est mécanique.

La cathode (*fig.* 88) est formée d'un mandrin A, en acier. Pour prévenir l'adhérence, cette

cathode est recouverte d'une mince couche de cuivre que l'on oxyde ensuite ; l'anode B, en cuivre brut, est coulée en forme d'U, de façon à régulariser le dépôt. La cathode est animée d'un mouvement de rotation, grâce aux roues dentées C et D, recevant le mouvement de la poulie E ; le courant est amené à la poulie F par le balai G. Le polissage est obtenu au moyen de brunissoirs en agate H, montés dans un support animé d'un mouvement de va-et-vient par l'axe fileté IJ, celui-ci tournant alternativement dans un sens et dans l'autre. Ce double mouvement est obtenu de la façon suivante : la tige K est articulée avec un levier L permettant, suivant que la pièce M est poussée à droite ou à gauche, d'embrayer ou de désembrayer les poulies O



FIG. 89. — Salle d'électrolyse de la Société française d'Électrométallurgie. Usine de Dives-sur-Mer (Calvados).

et N pouvant tourner en sens inverse l'une de l'autre, au moyen d'une courroie droite et d'une courroie croisée, fixées sur le même arbre. L'embrayage et le désembrayage des poulies permettant ce double mouvement se produisent au moyen des deux taquets P et P' fixés sur la tige K et contre lesquels vient buter successivement la pièce fixée au support des brunissoirs, lorsque celui-ci est à bout de course.

On obtient, par ce procédé, des tubes ayant jusqu'à 2,5 m de diamètre et 3,5 m de longueur. Par étirage, on peut arriver à faire varier à volonté les dimensions. On fabrique ainsi directement des rouleaux de machine à papier et à impression et des pièces de toutes sortes ; le métal obtenu est très malléable et se travaille bien. On lui reproche cependant de se braser difficilement, probablement par suite de l'interposition, sous l'influence des brunissoirs, de traces de sulfate de cuivre.

On peut obtenir également du cuivre en planches en coupant les cylindres suivant une génératrice, et du fil en coupant le tube en un ruban hélicoïdal que l'on tréfile ensuite.

Deux usines exploitent actuellement ce procédé :

La Société française d'Électrométallurgie, dont l'usine de Dives-sur-Mer (Calvados) peut produire par jour 10 tonnes de cuivre ainsi affiné. Cette usine, construite en 1891, occupe 4 hectares; la salle d'électrolyse a 100 m sur 60 m. Nous donnons (*fig.* 89) la photographie de cette salle;

L' « Elmore Metal Aktien Gesellschaft », qui, dans son usine de Schladern-sur-le-Sieg, utilise une force motrice de 200 chevaux.

Ces deux Sociétés avaient chacune, la première à l'Électrochimie, la seconde dans la classe des Mines et de la Métallurgie, une exposition excessivement intéressante et par le nombre des échantillons et par leurs dimensions.

*Procédé Cowper-Coles pour la fabrication des tubes de cuivre.* — Nous avons vu que l'on pouvait augmenter la densité de courant et, par suite, la vitesse du dépôt, tout en conservant au cuivre ses qualités, en augmentant la circulation de l'électrolyte; mais la vitesse du liquide, dans ces conditions, ne peut jamais être considérable ; de plus, elle est irrégulière; on a, au contraire, une action beaucoup plus régulière et une vitesse beaucoup plus grande si, au lieu de faire circuler l'électrolyte, on fait tourner la cathode.

Les avantages du procédé seront les suivants : On pourra opérer avec une densité de courant très élevée, jusqu'à 20 amp : dm², la tension nécessaire n'étant que de 0,5 à 0,7 volt. Le frottement du dépôt contre l'électrolyte est considérable, en raison de la grande vitesse; on a ainsi un dépôt très compact et uni; sous l'influence de la force centrifuge, les boues sont projetées contre les parois de l'appareil ; le liquide est bien homogène et il ne se produit pas de différences de concentration en certains points. Comme l'on marche à forte densité de courant, il peut se dégager de l'hydrogène à la cathode. Cet hydrogène est enlevé sous l'influence de la force centrifuge. La figure 90 montre en effet une cathode stationnaire; la figure 91, une cathode que l'on commence à faire tourner après être restée stationnaire; l'hydrogène, d'abord adhérent, se détache. Enfin, la figure 92 montre une cathode tournant depuis un certain temps. On ne voit même plus d'hydrogène ; non seulement celui qui tendrait à se former serait projeté au fur et à mesure. mais on peut même admettre qu'il ne s'en forme pas pour la même densité de courant, étant donné le renouvellement du liquide. On évite ainsi les conditions favorisant la production des nodules.

L'appareil employé pour la fabrication des tubes, et dont un modèle réduit se trouvait dans l'Exposition anglaise, groupe de l'Électricité, est le suivant (*fig.* 93 et 94) :

Une cuve de bois sert de récipient ; on y suspend les anodes en cuivre brut, coulées si possible en forme de gros tubes ou placées en cercle dans la cuve. La cathode est formée d'un cylindre en laiton B, légèrement graissé pour éviter l'adhérence du dépôt et permettre de la détacher facilement. Si l'on veut obtenir du cuivre en ruban, on enroule en hélice, sur la surface de la cathode, un fil en substance isolante, en faisant le pas de l'hélice égal à la largeur du ruban que l'on désire. Une fois l'opération finie, il est facile de couper le tube suivant cette hélice et de dérouler le ruban après avoir recuit le métal. Pour avoir des plaques, on coupe le tube suivant une génératrice. La cathode porte à la partie supérieure un anneau D en permettant la manœuvre facile et une large bague E sur laquelle frottent les balais F, reliés au pôle négatif de la source d'électricité. Le porte-balais G est mobile autour d'un axe, ce qui permet d'écarter les balais pour retirer la cathode. Au bas de la cathode se trouve un plateau H, à bord relevé, fait en matière isolante qui empêche la formation du dépôt à l'extrémité inférieure où il est généralement irrégulier et couvert de nodules.

L'électrolyte circule également; il est injecté dans la cuve tangentiellement aux parois, soit par le moyen d'une pompe, soit par le moyen de l'air comprimé; à sa sortie de l'électrolyseur, il est filtré pour en retirer les boues qu'il renferme.

L'électrolyte donnant les meilleurs résultats a la composition suivante :

| | | |
|---|---|---|
| Eau........................................ | 74,36 0/0 | en poids |
| Acide sulfurique.......................... | 10,77 0/0 | — |
| Sulfate de cuivre......................... | 14,87 0/0 | — |

La proportion d'acide libre n'a qu'une faible influence sur la quantité de cuivre dissous; elle agit considérablement, au contraire, sur la tension aux bornes de l'électrolyseur, qui est fortement influencée et varie en raison inverse de la quantité d'acide libre, principale-

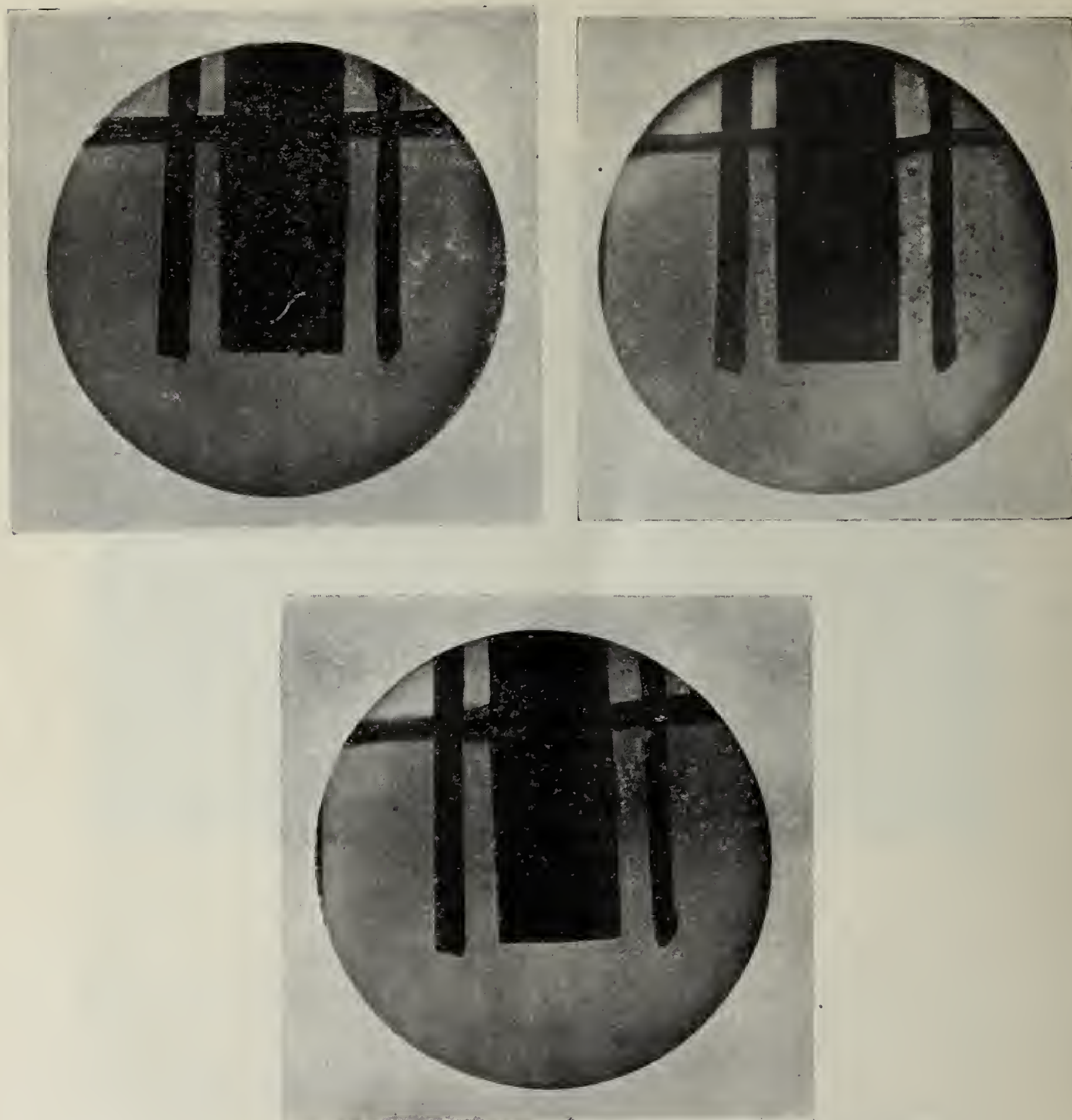
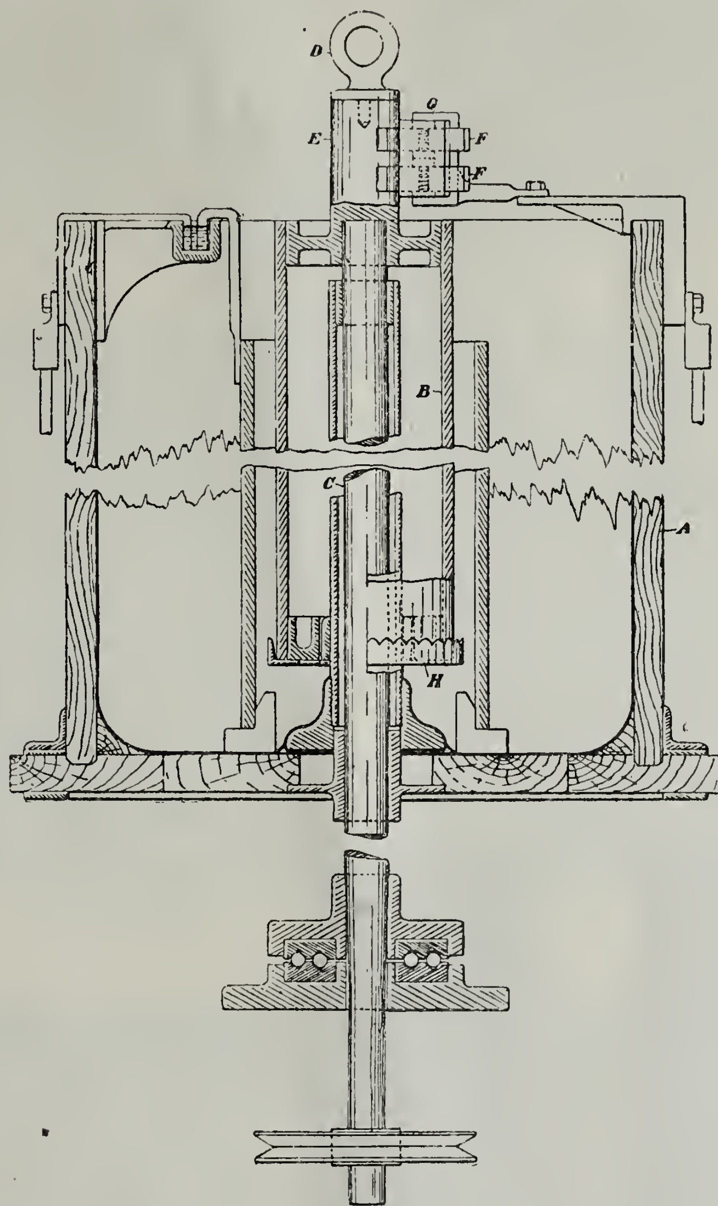


Fig. 90, 91 et 92. — Influence de la rotation sur le dégagement d'hydrogène à la cathode.

ment à froid. Vers 70°, l'addition d'acide libre n'a pas d'influence sensible. Avec l'appareil indiqué, on emploie une densité de courant de 11 amp : $dm^2$ et une vitesse périphérique de 2,5 m par seconde, en employant comme électrolyte une solution de sulfate de cuivre à 200 gr par litre à 25°; on trouve que, si cet électrolyte ne renferme pas d'acide sulfurique, la tension est de 3,5 volts ; avec 12,5 gr par litre, 1,3 volt; avec 25 gr, 0,9 volt ; avec 50 gr, 0,75; avec

125 gr, 0,7 volt ; dans ces conditions, mais à froid, la tension est beaucoup plus élevée. La température la plus convenable paraît d'ailleurs être de 65°.

En opérant avec l'électrolyte indiqué plus haut et à la température de 65-70°, on remarque, avec une densité de courant de 10 à 15 ampères par décimètre carré, que le dépôt obtenu, si l'on



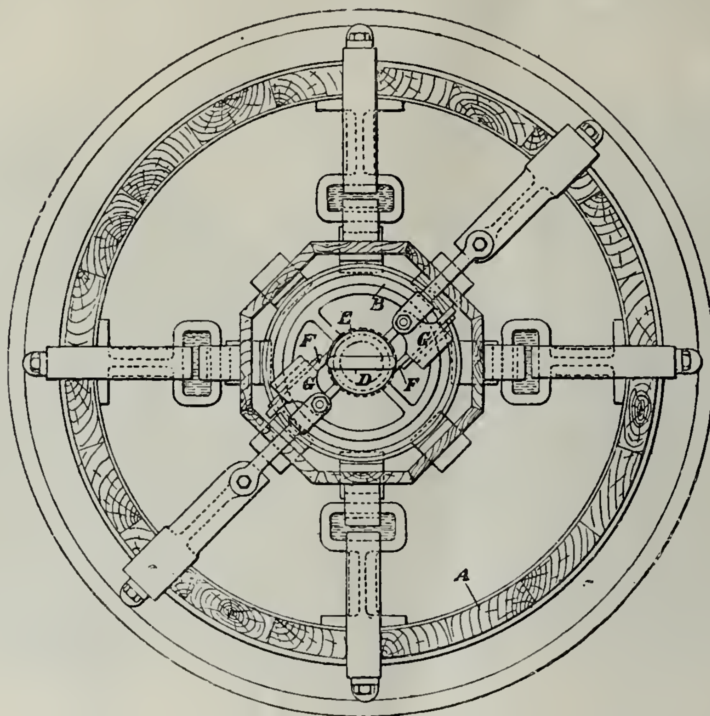

Elévation.

Fig. 93. — Appareil pour la fabrication des tubes, feuilles et rubans en cuivre électrolytique par le procédé centrifuge de M. S. Cowper-Coles.

ne fait pas tourner la cathode, est rouge, cristallin, sans cohésion aucune, qu'il tombe en poussière ; si on fait tourner la cathode de plus en plus vite, le dépôt prend peu à peu de la cohésion, mais reste cristallin et sa surface est granuleuse, puis les aspérités disparaissent et, finalement, on a un dépôt uni, dont la teinte rose clair est analogue aux dépôts obtenus par les autres procédés.

M. Cowper-Coles exposait, à côté du modèle de l'appareil, une série de 6 tubes, obtenus

avec des vitesses de rotation différentes et qui montraient bien cette action. Nous donnons




Plan.

Fig. 94. — Appareil pour la fabrication des tubes, feuilles et rubans en cuivre électrolytique par le procédé centrifuge de M. S. Cowper-Coles.

(*fig.* 95 et 96) la photographie de deux de ces tubes, fabriqués dans les mêmes conditions, avec l'électrolyte suivant :

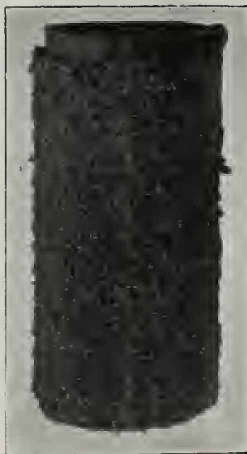
| | |
|---|---|
| Eau .................. | 64 0/0 |
| Acide sulfurique ...... | 23 — |
| Sulfate de cuivre ...... | 12 — |

et une densité de courant de 19 amp : dm²; pour l'un, la vitesse de rotation est de 60 tours par minute et, pour l'autre, de 1 000 tours par minute.

On peut également, par ce procédé, obtenir des feuilles minces de la façon suivante : Lorsque l'on a obtenu un dépôt d'épaisseur suffisante, on le recouvre d'une couche de graisse ou de plombagine, on fait un nouveau dépôt et ainsi de suite. Lorsque l'on en a un certain nombre, on coupe comme à l'ordinaire, suivant une génératrice ou une hélice, pour avoir des feuilles ou des rubans.



Vitesse 1 000 tours : minute.



Vitesse 60 tours : minute.

Fig. 95 et 96. — Photomicrographies d'échantillons de cuivre obtenus avec des vitesses différentes.

M. Cowper-Coles exposait également une série de photomicrographies d'échantillons de cuivre obtenus dans diverses conditions.

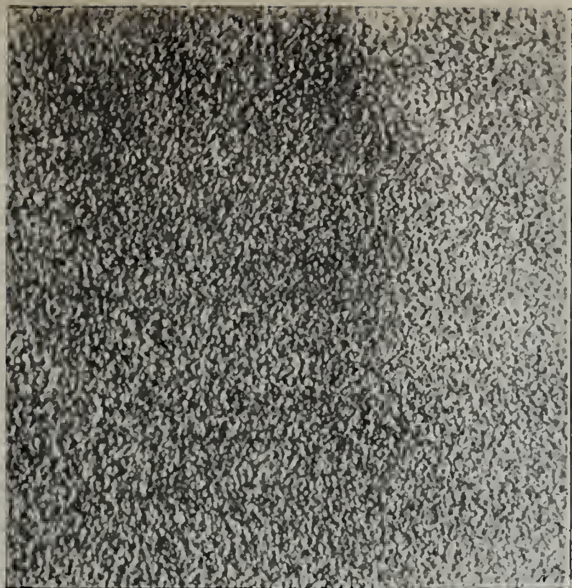


Fig. 97.



Fig. 98.

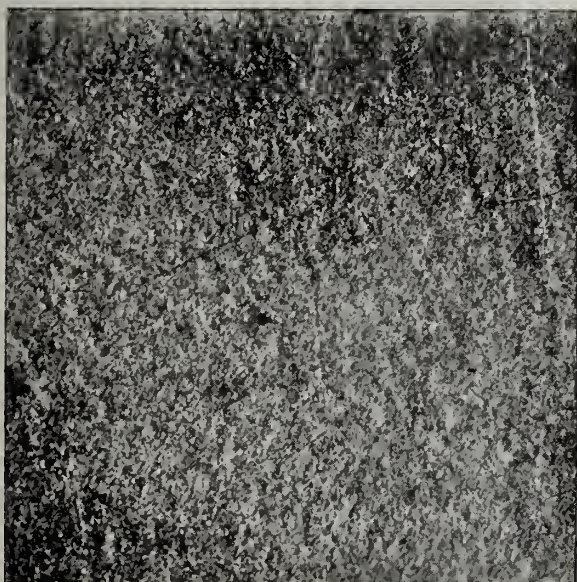


Fig. 99.



Fig. 100.

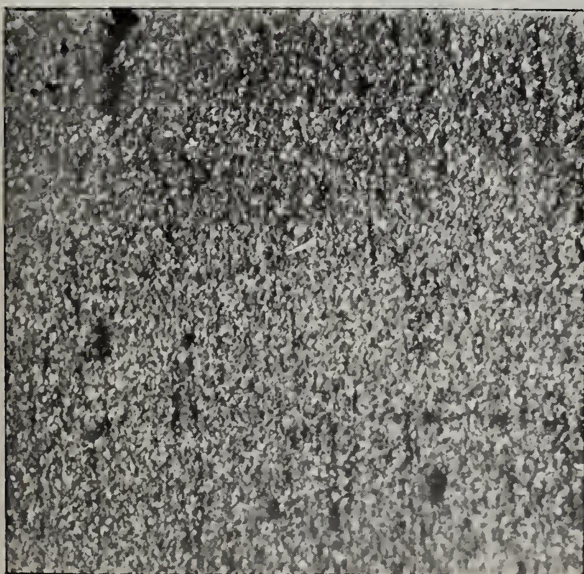


Fig. 101.

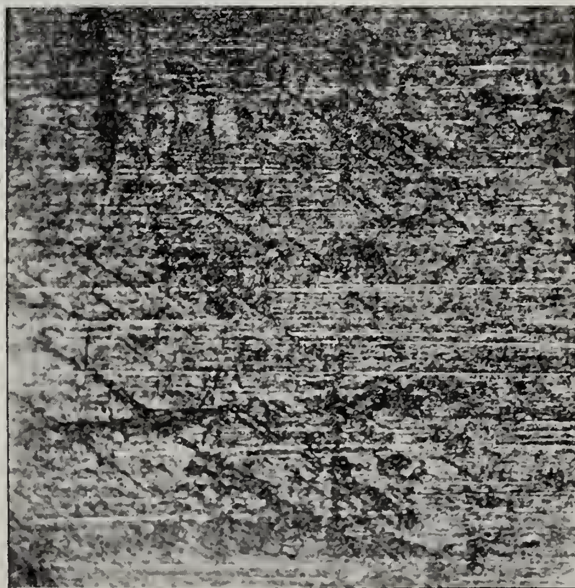


Fig. 102.

Fig. 97 à 102. — Photomicrographies d'échantillons de cuivre obtenus avec des vitesses, des concentrations et des températures variables.

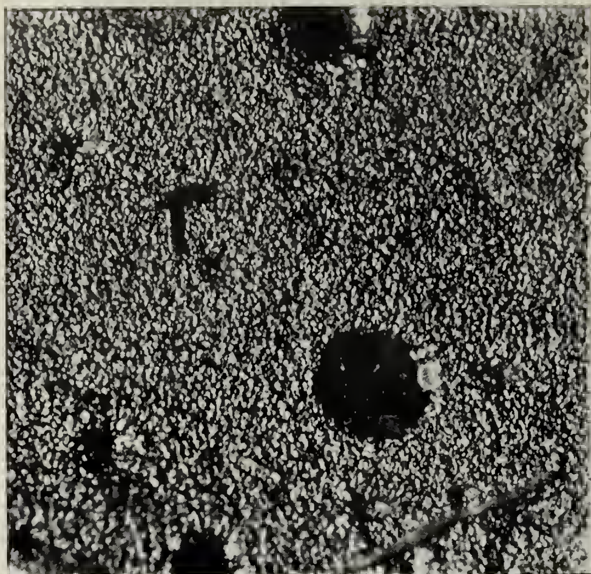


Fig. 103.

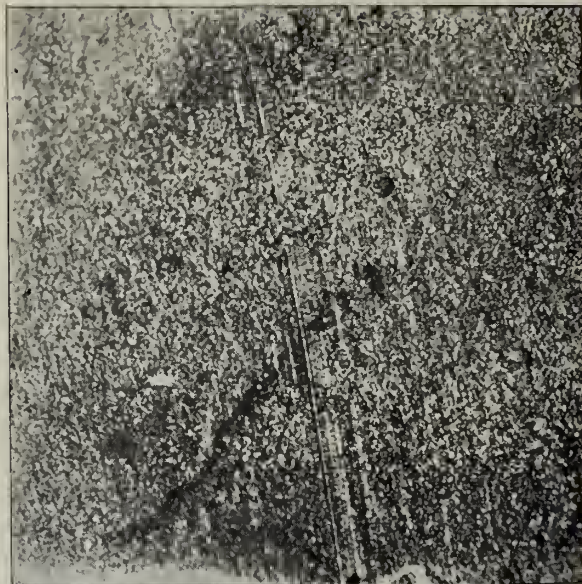


Fig. 104.

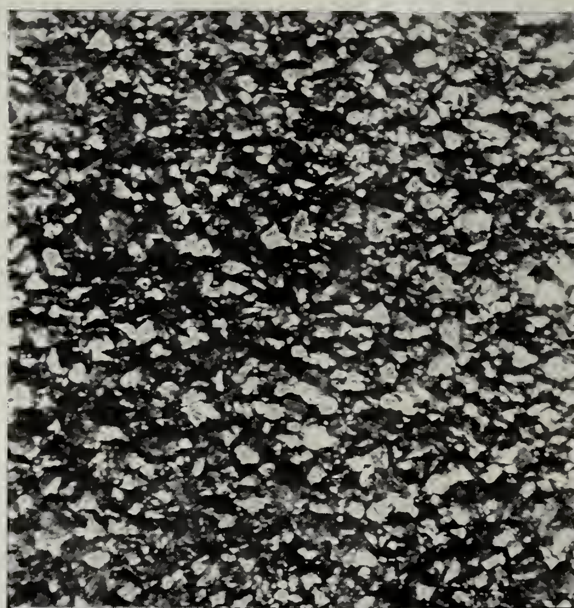


Fig. 105.

Fig. 103 à 105. — Photomicrographies d'échantillons de cuivre obtenus avec des vitesses, des concentrations et des températures variables.

| | Densité de courant par dm² | | Électrolyte |
|---|---|---|---|
| 1. Figure 97 ........... | 11 ampères | Révolution rapide | Chaud |
| 2. — 98 ........... | 17 — | Id. | Id. |
| 3. — 99 ........... | 24,5 — | Id. | Id. |
| 4. — 100 ........... | 4,5 — | Id. | Froid |
| 5. — 101 ........... | 4,5 — | Stationnaire | Chaud |
| 6. — 102 ........... | 11 — | Id. | Id. |
| 7. — 103 ........... | 1 — | Id. | Froid |
| 8. — 104 ........... | 1 — | Id. | Id. |
| 9. — 105 ........... | Pile Daniell | | |

*Fabrication de miroirs paraboliques.* — M. Cowper-Coles a imaginé un procédé de fabrication de miroirs par électrodéposition. Le principe est le suivant : on prépare un moule en verre devant servir de type, on l'argente par voie chimique, on le recouvre d'un dépôt de cuivre électrolytique, puis on le retire pour le recouvrir à l'intérieur d'une couche de palladium.

Le moule en verre est obtenu de la façon suivante : On fait une matrice en fonte ayant approximativement la forme du miroir, on en prend une empreinte en matière réfractaire que l'on cuit, puis on place dessus une plaque de verre de 2 cm; le tout est introduit dans un four à la température du ramollissement du verre. Celui-ci s'affaisse; le moule obtenu est rodé sur le côté convexe seulement; on lui donne la courbe désirée et, finalement, il est poli. On obtient ainsi un négatif du miroir à fabriquer, qui a demandé moins de travail qu'un miroir véritable, puisqu'une seule face est achevée, mais qui permettra d'en faire un nombre indéfini. Il faut avoir soin, pour la fabrication de la pièce de fonte primitive, de tenir compte du retrait à la cuisson du contre-moule en matière réfractaire.

Pour argenter le moule, on commence par le monter pour en permettre la manœuvre facile. A cet effet, on adapte à la partie concave (*fig.* 106) une ventouse D reliée à une pompe à vide E; on peut alors facilement tenir le moule sans risquer de le briser. Le moule, avant d'être argenté, est placé dans la position indiquée sur la figure, puis nettoyé avec une bouillie d'ammoniaque et de peroxyde de fer destinée à enlever complètement les matières grasses qui empêcheraient l'adhérence du dépôt d'argent. Ce dépôt est obtenu par voie chimique, comme cela a lieu pour l'argenture des miroirs de télescope, au moyen d'une solution d'oxyde d'argent ammoniacal à laquelle on ajoute, au moment de s'en servir, une solution de glucose. On place le moule dans cette solution, la face en dessous, en faisant basculer le support F au moyen d'un levier et enfonçant plus ou moins le moule au moyen de la vis G; l'argent commence à se déposer au bout de quatre ou cinq minutes et, en trente-cinq minutes, le dépôt est complet. On enlève le moule, on lave, puis on polit le dépôt, ensuite on retire la ventouse et on applique sur le moule un anneau métallique à rebord intérieur qui servira à le plonger dans le bain de cuivrage. Cet anneau sert à former la connexion électrique avec l'argent du miroir. Le moule ainsi préparé est placé dans l'appareil d'électrolyse (*fig.* 107), dont un spécimen de dimension réduite se trouvait dans l'Exposition anglaise (groupe V, Électricité). Des chevilles C le suspendent à quatre traverses D formant un cadre; elles sont reliées à un axe vertical E, supporté par une traverse par l'intermédiaire d'une pièce $E^2$ permettant un mouvement d'oscillation.

La tige E est maintenue sur la traverse au moyen d'un collier $E^1$ tournant sur un palier à billes $F^2$; une poulie G permet de faire tourner l'ensemble du système. La cuve d'électrolyse est supportée par un bâti auquel est fixée la traverse supportant le système cathodique. L'anode est placée au fond de la cuve et reçoit le courant par des barres $K^1$ placées sur les côtés. Cette anode est plate ; on a ainsi le double avantage d'avoir une épaisseur de cuivre déposée plus grande au centre du miroir, et de diminuer, au contraire, l'épaisseur des bords où le cuivre a toujours tendance à former des nodules, que l'on évite, en outre, au moyen d'une plaque de garde B, en même temps qu'un anneau P sert à donner la dimension exacte du miroir. Ces deux pièces sont maintenues par une série de petits boulons placés autour.

Le liquide arrive par la partie inférieure et s'écoule par un trop-plein situé à la partie supérieure; cet électrolyte a la composition suivante :

| | |
|---|---|
| Eau .................................. | 83 parties |
| Acide sulfurique ...................... | 3 — |
| Sulfate de cuivre ..................... | 14 — |

On commence par déposer une légère couche de cuivre sur toute la surface de l'argent ; à cet effet, on introduit le moule dans l'électrolyte ; mais on n'a pas encore mis l'anneau d'arrêt et

la plaque de garde; on fait tourner à la vitesse de 15 tours par minute et on produit un premier dépôt avec une très faible densité de courant. Il est très important que la couche d'argent soit immédiatement recouverte de cuivre; lorsque le dépôt est suffisant, on soulève le tout, on adapte la plaque de garde et l'anneau d'arrêt et on replonge la cathode dans le bain. On établit le courant à son régime normal, à la densité de 2 amp : $dm^2$ et on donne le mouvement de rotation; on laisse le tout dans ces conditions jusqu'à ce que le dépôt soit suffisamment épais. L'opération se fait à la température ordinaire.

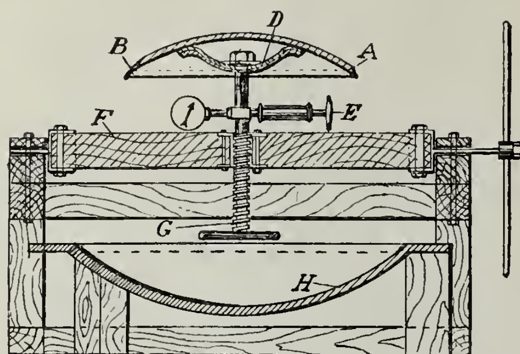


Fig. 106. — Dispositif pour l'argenture du moule destiné à la fabrication d'un miroir électrolytique.

Pour retirer le miroir du moule, on place le tout dans l'eau que l'on porte à la température de 50° et les deux pièces se séparent sous l'influence des dilatations inégales. Le moule, à nouveau nettoyé, est remis en œuvre.

Le miroir ainsi détaché se trouve donc argenté et prêt à servir; malheureusement, bien que

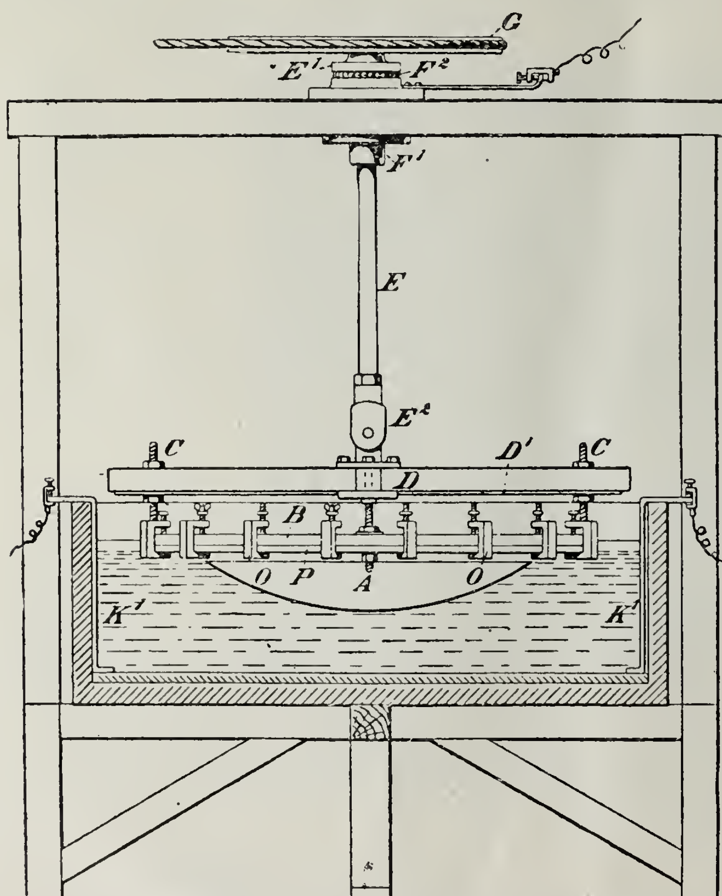
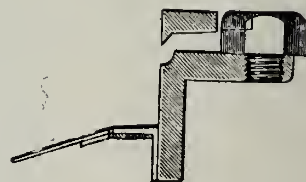


Fig. 107. — Appareil pour la fabrication des miroirs par électrolyse.


Fig. 108.

l'argent ait le pouvoir réflecteur le plus considérable, ce métal ne peut être employé, car il se ternit rapidement; le chrome, qui a un pouvoir réflecteur sensiblement égal, ne peut pratique-

ment être déposé. Il faut avoir recours au platine ou au palladium, qui ont un pouvoir réflecteur beaucoup plus faible, mais se déposent très bien par électrolyse, le dernier principalement.

La couche de palladium que l'on dépose représente 0,5 à 0,55 gr : dm²; pour éviter toute

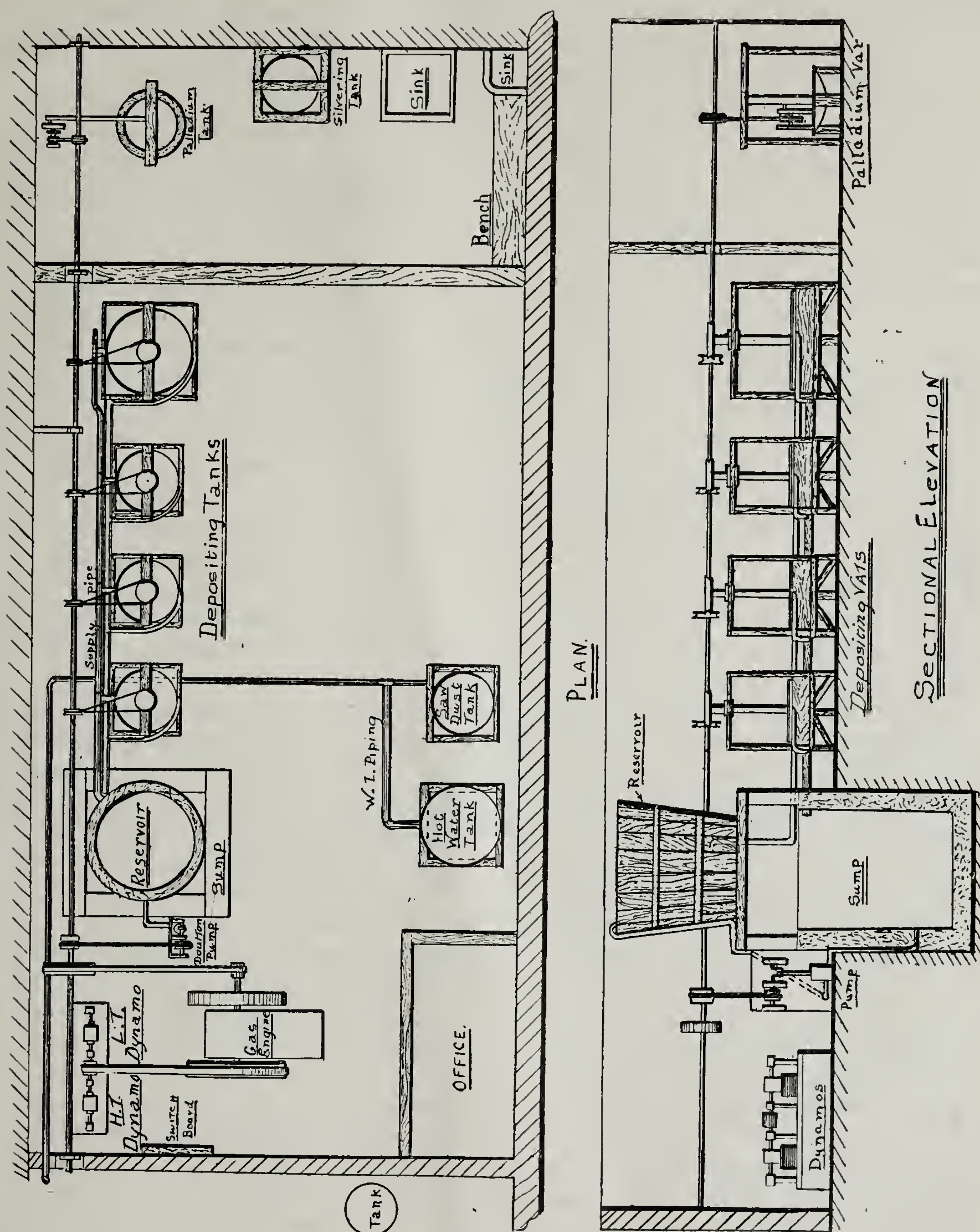



Fig. 109 et 110.

action locale, on a eu soin de vernir toute la partie du miroir ne devant pas recevoir la couche de métal. On peut également déposer du platine à raison de 1 gr : dm².

Le miroir lavé à l'eau bouillante est ensuite monté pour être utilisé; à cet effet, on emploie (*fig.* 108) une garniture en aluminium, portant à sa partie supérieure un anneau d'amiante contre lequel vient s'appuyer le réflecteur maintenu par une bague à bord tranchant.

Ces miroirs sont, paraît-il, plus durables, plus économiques et donnent plus de clarté que les miroirs actuels. Ils peuvent être chauffés fortement sans se ternir et la projection d'eau salée donne simplement un dépôt de sel facile à enlever avec un linge humide. Un réflecteur a été traversé par un certain nombre de balles, sans que le parallélisme des rayons ait été sensiblement affecté. Des miroirs de 1 m de diamètre, placés dans un projecteur avec des arcs de 175 ampères, ne donnent, après six heures, qu'un dépôt insignifiant, facile à enlever avec une peau de chamois, bien que la température du réflecteur fût maintenue à 390°.

Les figures 109 et 110 montrent la disposition, en élévation et plan, d'une installation faite pour le War Office, en Angleterre, dans l'usine de MM. Chance frères et Cie, de Smethwich, près de Birmingham, pour la fabrication de réflecteurs servant à la défense des côtes.

Galvanoplastie proprement dite. — Cette partie de l'électrochimie consiste, comme chacun le sait, à faire un négatif de l'objet que l'on veut reproduire en le moulant au moyen de différentes substances plastiques, dont les principales sont la cire et la gutta, et, après avoir rendu la surface du moule conductrice au moyen de plombagine ou de cuivre porphyrisé, on emploie ce moule comme une cathode dans un bain de sulfate de cuivre acide en utilisant une anode soluble en cuivre. Il est inutile de fournir de plus amples détails sur ces procédés connus de tous. Rappelons également que l'on donne à la gutta et à la cire une certaine conductibilité dans la masse en les pétrissant avec 10 0/0 de plombagine.

La puissance nécessaire pour faire la galvanoplastie est extrêmement faible, puisque, grâce à l'anode soluble, on a un simple transport de cuivre de l'anode à la cathode.

La galvanoplastie s'applique principalement au cuivre.

La maison Christophle exposait des séries de modèles, de moules et de reproductions montrant la façon de tourner les difficultés, surtout lorsqu'il s'agit de reproduction de pièces en ronde-bosse.

La maison Delval et Pascalis exposait des séries de modèles, moules et reproductions. Elle exposait également un certain nombre de moules en gutta d'une série nombreuse qu'elle met en vente et tout le matériel destiné à la galvanoplastie.

Il y a lieu de remarquer toutefois que la galvanoplastie proprement dite, ayant pour but la reproduction de pièces artistiques, est beaucoup moins employée qu'autrefois. Par contre, l'industrie utilise la galvanoplastie sur une grande échelle pour la reproduction de clichés typographiques. Le cliché primitif, en bois ou en zinc, est moulé à la cire plombaginée ; le cliché est reproduit et la feuille mince de cuivre obtenue est consolidée en coulant un alliage spécial, en général du plomb antimonié. Le tout est fixé sur une planche en bois et permet de faire des tirages, comme dans le cas du cliché primitif. On peut ainsi conserver le cliché type pour le cas où l'on doit tirer à un nombre considérable d'exemplaires.

La galvanoplastie s'applique à peu près exclusivement au cuivre. Cependant la maison Delval et Pascalis exposait des clichés typographiques et des reproductions galvanoplastiques en nickel ; la maison Boudreaux s'est fait une spécialité de clichés typographiques en nickel dont elle exposait une série complète dans l'annexe. Un certain nombre de ces clichés figuraient déjà à l'Exposition de 1889.

Il y a lieu de remarquer que, pour avoir un bon dépôt de nickel sur moule rendu conducteur, il faut, au préalable, cuivrer la surface du moule en la mouillant avec une solution de sulfate de cuivre et en saupoudrant de limaille de fer ; il se produit alors un couple et le cuivre se dépose sur la plombagine. Il faut avoir soin de remuer la limaille pour avoir un dépôt uniforme.

Enfin la maison Gautier exposait dans la classe de la Bijouterie des reproductions galvanoplastiques en or, et les maisons Christophle et Delval et Pascalis exposaient dans la classe d'Électrochimie un certain nombre de sujets galvanoplastiques en or et en argent. Ces pièces sont obtenues en employant le bain au cyanure analogue à celui de la dorure et de l'argenture.

L'Exposition centennale d'Électricité renfermait le buste de J.-B. Dumas, fabriqué en galvano de cuivre par MM. Christophle (1845), ainsi que le moule en ronde-bosse avec armature en

plomb procédé G. Planté (1862), celui avec armature en platine procédé Lenoir (1864), un grand plateau en galvano de cuivre fait par Jacobi, en 1840, et une coupe de 13 cm en galvano de fer également de Jacobi (1865).

Cuivrage. — Le cuivrage à épaisseur constitue une industrie florissante depuis longtemps. La difficulté du cuivrage des métaux : fer, zinc, etc., tenait à ce que ces métaux déplacent le cuivre de ses solutions sans l'intervention du courant et ne donnent, pour cette raison, aucun dépôt régulier, mais précipitent le métal à l'état de boue. Le cuivrage de la fonte avait été résolu dès 1856, par Oudry, en déposant, sur l'objet à cuivrer, un vernis protecteur, lequel était rendu conducteur, ensuite, par une couche de plombagine; le tout était mis dans un appareil simple, c'est-à-dire dans une sorte d'immense pile Daniell, dont l'objet formait le pôle positif. Le cuivrage demandait de trois semaines à un mois; c'est de cette façon que furent fabriquées les colonnes, candélabres et fontaines de la place de la Concorde et des Champs-Elysées.

La plupart des candélabres à gaz de la Ville de Paris furent obtenus ainsi; mais actuellement, on revient à l'ancien procédé consistant à les enduire d'un vernis renfermant du cuivre porphyrisé auquel on donne, une fois sec, la patine voulue.

Un procédé analogue est exploité par la maison Boischevallier, qui exposait dans la classe de l'Ameublement et qui fabrique des objets en plâtre ou bois recouverts de cuivre à grande épaisseur. Cette maison fabrique plus spécialement des reproductions d'objets d'art et des pièces pour l'architecture et l'ameublement.

On arrive couramment, à l'heure actuelle, à recouvrir directement les métaux : fer, zinc, etc., d'une couche de cuivre, sans l'intermédiaire d'un enduit isolant entre le métal et le cuivre, par un artifice consistant à déposer une première couche de cuivre en bain de cyanure double de cuivre et de potassium, obtenu par addition d'une solution d'acétate de cuivre à une solution de cyanure de potassium. On obtient ainsi un dépôt adhérent, rosé, très joli, surtout lorsque l'on opère en bain tiède; il faut utiliser une densité de courant excessivement faible.

Le mode opératoire est le suivant :

L'objet est nettoyé, limé, ciselé et recouvert d'une mince couche de cuivre en bain, alcalin. Cette première couche a pour but de montrer les irrégularités de la pièce que l'on retouche en limant les aspérités et remplissant les trous de soudure en métal fusible. On peut également corriger le non-dépôt dû à un reste de corps gras par un nettoyage approprié. On recouvre d'une seconde couche toujours en bain alcalin, on lave à l'eau et on donne une troisième couche en bain de sulfate de cuivre acide, à laquelle on donne l'épaisseur convenable en employant une densité de courant beaucoup plus considérable.

La maison Martinet-Dessolle et C^ie exposait, dans la classe 24, une collection complète d'objets ainsi préparés. Pour augmenter la vitesse du dépôt en bain de sulfate sans nuire à l'adhérence, le liquide est constamment animé d'un mouvement rapide, ce qui permet de porter la densité de courant à plus de 10 amp : $dm^2$ de cathode.

Ce brassage est obtenu en faisant écouler le liquide par un trop-plein placé à la partie supérieure; il est ensuite envoyé au moyen d'une pompe dans un réservoir élevé, et retourne à la cuve par un tube percé d'une série de petits trous disposés de telle façon que le liquide s'échappe sous forme de jets qui viennent frapper l'objet, évitent toute polarisation et renouvellent constamment le liquide.

On arrive par ce procédé à donner une bonne épaisseur en six heures environ. Le dépôt est parfaitement homogène; il présente une telle adhérence que la pièce peut, paraît-il, être chauffée au rouge, puis trempée dans l'eau, martelée à froid, emboutie, pliée, sans que le cuivre se soulève et se détériore d'aucune façon. Enfin une tôle d'acier ainsi cuivrée possède la propriété de ne plus se tremper et, après avoir été chauffée et plongée dans l'eau, conserve la malléabilité de l'acier recuit.

L'orfèvrerie emploie également la galvanoplastie pour l'ornementation du verre, du cristal, etc... A cet effet, on dessine sur l'objet, soit à la main, soit par un procédé mécanique, au moyen d'un vernis approprié tenant en solution du chlorure d'or ou de platine. Après dessic-

cation, on chauffe pour mettre le métal en liberté, puis on dépose une couche de cuivre que l'on peut ensuite recouvrir d'un autre métal, travailler, ciseler, etc. On peut également argenter les endroits à recouvrir, en opérant comme dans le cas de l'argenture des glaces. La maison Christophle exposait un certain nombre d'objets très intéressants obtenus de la sorte.

Une autre application est le cuivrage des charbons artificiels pour lumière électrique, balais de dynamos, soudure, électrodes, etc., dont la société « le Carbone » exposait de nombreux échantillons.

L'Exposition centennale d'Électricité renfermait une métallisation de feuillage naturel, une cafetière en porcelaine entourée de vannerie métallisée, une carafe en verre, découpée, gravée et métallisée provenant de M. Ch. Christophle (1845), et un vide-poche feuille de chou, décoré de plantes, feuillage, insecte, recouvert de cuivre galvanique, exécuté en 1846 dans les ateliers Christophle.

L'Exposition centennale d'Électricité renfermait également des dépôts de fer et nickel obtenus par MM. A. et Ed. Becquerel, en 1844-1862.

## OR ET ARGENT

Il est bien difficile de séparer en deux chapitres distincts les industries électrolytiques se rapportant à ces métaux, la plupart du temps alliés. L'or extrait par voie électrolytique renferme toujours plus ou moins d'argent; de même l'argenture et la dorure s'effectuent par des procédés identiques.

Dans l'affinage des métaux précieux, provenant soit de produits d'extraction, soit des boues d'affinage du cuivre, soit du traitement de résidus argentés ou dorés, on peut plus particulièrement regarder commes procédés d'affinage d'argent ceux dans lesquels l'argent est directement séparé pur, comme dans le procédé Mœbius, et comme procédés d'affinage de l'or ceux dans lesquels ce métal est directement isolé, comme dans le procédés Wohlwill; enfin, le procédé Dietzel est un procédé mixte, permettant de recueillir directement les deux métaux dans une seule opération.

On peut donc admettre la classification suivante :

Extraction de l'or, Siemens et Halske ;

Affinage de l'argent, Mœbius ;

Affinage de l'or, Wohlwill ;

Procédé mixte, Dietzel ;

Argenture ;

Dorure.

Dans l'affinage de ces métaux d'une très grande valeur, le capital immobilisé est considérable ; aussi cherche-t-on à le diminuer dans la mesure du possible. On augmente même la densité de courant au point de les obtenir à l'état grenu ou cristallin pour les fondre ensuite, le prix d'une fusion étant insignifiant à côté de la valeur des métaux et de l'économie réalisée. D'autre part, ces métaux ainsi déposés sont à l'état de pureté parfaite. Ils ne se comportent donc pas comme le cuivre qui est impur lorsque la densité de courant est trop considérable.

Extraction de l'or. — Le traitement électrolytique des minerais d'or a été l'objet d'un certain nombre de procédés ; mais seul le procédé Siemens et Halske a donné de bons résultats et a été essayé, sur une assez grande échelle, en Transylvanie, en Sibérie et au Transvaal, où il est employé pour retirer le métal précieux des solutions cyanurées concurremment avec le procédé Mac Arthur et Forrest et celui de Betty.

Le minerai du Transvaal est peu riche en or. C'est un conglomérat de roches quartzeuses réunies par un ciment renfermant de la pyrite. C'est dans ce ciment que l'or se trouve disséminé à l'état de grains microscopiques, généralement recouverts d'une légère couche noire, les parties les plus riches se trouvant au voisinage immédiat des blocs de quartz laiteux se présentant sous l'aspect de galets roulés; le ciment se trouvant au bord du filon (mur) est également plus

riche. Les cristaux de pyrite renferment des parcelles d'or soit dans leur masse, soit dans leur voisinage immédiat.

La teneur du minerai est assez constante et varie de 15 à 20 gr d'or à la tonne; les teneurs limites sont de 6 à 36 gr d'or à la tonne; on n'y trouve que tout à fait exceptionnellement des pépites et encore sont-elles au plus de 1 à 4 gr.

La profondeur moyenne du banc est de 100 m.

Le minerai sortant de la mine est séparé des poussières trop pauvres pour être traitées qui représentent le quart du minerai et la vingtième partie de l'or total. Il est ensuite concassé et arrive, par une trémie à distribution automatique, dans des bocards, qui reçoivent en même temps une quantité d'eau considérable, environ dix fois le poids du minerai. Les pilons, du poids de 400 à 600 kg, transforment le minerai en une boue liquide, la pulpe, qui s'échappe du mortier et, après tamisage, tombe sur la table d'amalgamation. Cette dernière est formée d'une plaque en cuivre, mouillée de mercure, qui retient l'or contenu dans la pulpe. L'amalgame est séparé, distillé dans une cornue, le mercure est recueilli et l'or, après fusion au four à vent, est coulé en lingots. On retire ainsi un peu plus de la moitié de l'or contenu dans le minerai, en général de 60 à 70 0/0. On ne peut traiter par amalgamation que les parcelles d'or un peu grosses.

La boue restante est traitée par le cyanure de potassium qui dissout l'or; ce dernier est précipité soit par le zinc (procédé Mac Arthur et Forrest), soit par le couple zinc-plomb (procédé Betty), soit par électrolyse (procédé Siemens et Halske).

*Cyanuration.* — La pulpe sortant de la table d'amalgamation tombe sur une table à secousses (Frue Vanner), qui permet de recueillir les concentrés (concentrates), formés de pyrites et de sables grossiers riches en or. Elle est ensuite élevée par une roue à augets dans une caisse où se fait la séparation en tailings formés de sables qui se déposent et en boues (slimes) qui sont évacuées dans une autre cuve. Ces boues sont formées principalement d'argile.

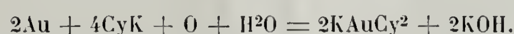
Ces trois produits, dont la richesse est très différente, sont traités chacun d'une façon spéciale.

Les concentrés tiennent 30 gr d'or à la tonne, quelquefois 90 et jusqu'à 210 gr et représentent 2,5 0/0 du minerai; les tailings tiennent 6 à 9 gr et représentent 50 0/0 du minerai; enfin les slimes tiennent 15 gr et représentent 12 à 13 0/0 du minerai.

Les concentrés sont en général réunis et traités dans une seule usine par grillage et chloruration. Les tailings sont lessivés dans des cuves à filtre avec des solutions de cyanure de potassium tenant de 0,05 à 0,1 0/0 du sel; le temps de lessivage est de six à dix jours. Il est à remarquer, en effet, que la dissolution de l'or est assez lente; on ne peut donc traiter ainsi que les minerais renfermant l'or en parcelles très fines; c'est pourquoi on ne peut employer uniquement la cyanuration; on doit toujours la faire précéder de l'amalgamation.

Pour les slimes, il suffit d'une solution à 0,01 0/0 de cyanure avec laquelle on les agite pendant cinq ou six heures; on laisse décanter pendant un temps qui varie suivant la constitution mécanique de ces boues, mais qui est en moyenne de huit à douze heures et, après la séparation de la boue, la solution d'or est décantée et filtrée sur un banc de sable. On répète le traitement au moins trois fois avec des solutions de plus en plus diluées.

L'or se dissout dans le cyanure à la faveur d'une oxydation :



$$2Au + 4CyK + O + H^2O = 2KAuCy^2 + 2KOH.$$

Cette oxydation se fait sous l'influence de l'oxygène de l'air en solution dans l'électrolyte; cette quantité est d'ailleurs excessivement faible, étant donné le poids atomique considérable de l'or et la faible quantité de ce métal à faire entrer en solution.

La différence de grosseur des grains de métal explique la différence de temps nécessaire pour la dissolution du métal contenu dans les deux sortes de produits traités.

Les appareils de lessivage sont très simples; ils consistent, suivant l'importance de l'installation, en cuves cylindriques en bois ou tôle d'acier ; sur le fond de cette cuve, se trouve une grille en bois recouverte de nattes de coco qui servent de filtres.

La grandeur de ces cuves est choisie de telle sorte qu'une seule puisse contenir la production d'un jour. Un mètre cube de tailings pèse environ 1 250 kg, une cuve de 5 m de diamètre et de 3 m de hauteur, soit 85 $m^3$, suffit donc pour un traitement journalier de 100 tonnes. Les plus grandes cuves tiennent 800 $m^3$ et peuvent servir, par conséquent, pour un traitement de 1 000 tonnes de tailings, soit au total 2 000 tonnes de minerai. La dimension la plus usitée tient 350 tonnes environ.

Le nombre des cuves se déduit du temps nécessaire au lessivage ; il varie de six à dix suivant que le lessivage des tailings dure de six à dix jours.

Le remplissage des tailings dans les cuves se fait au moyen de wagonnets qu'une voie ferrée amène au-dessus de la cuve. L'eau est ensuite soutirée et remplacée par la solution de cyanure dont l'évacuation se fait au moyen d'ouvertures placées dans le fond de la cuve. Les tailings sont enlevés par des portes pratiquées à la partie inférieure, formant un joint étanche et boulonnées à la façon des trous d'hommes.

Si on traite par ce procédé les concentrés, qui sont produits en faible quantité, dont la durée d'attaque est beaucoup plus longue, on réunit les opérations d'un certain nombre de jours, variable suivant la production de l'installation et la durée de l'attaque.

Toutes les espèces de minerai ne sont pas appropriées au traitement au cyanure. Il faut que les minerais traités ne renferment pas de produits détruisant le cyanure de potassium ; les composés du cuivre et du zinc que l'on rencontre fréquemment avec les minerais d'or sont nuisibles, de même que les matières organiques.

On a cherché à annuler l'action de ces différents produits, mais sans beaucoup de succès, en utilisant des oxydants, tels que le ferricyanure et le permanganate de potassium, ou par simple emploi de l'air.

De même, comme nous l'avons vu, le procédé de la cyanuration ne s'applique qu'aux minerais renfermant l'or en fines granulations, les grains trop gros s'attaquant trop lentement, d'où la nécessité de passer au préalable par l'amalgamation.

La pyrite ne se traite bien que si elle a été très finement pulvérisée ; mais, si elle contient de l'antimoine, de l'arsenic ou du tellure, elle doit être grillée au préalable.

Si les minerais sont friables, il est préférable de les laver d'abord à l'eau ; s'ils sont acides, l'acidité doit être neutralisée par un lait de chaux.

Des solutions cyanurées, il faut ensuite retirer l'or.

Le tableau ci-contre représente schématiquement les diverses opérations avec les poids de minerai et d'or correspondant à chaque genre de traitement.

*Procédé Mac Arthur et Forrest.* — Ce procédé consiste à traiter la solution de cyanure double d'or et de potassium par du zinc en frisure ou en planure. La boue obtenue est traitée par l'acide sulfurique pour enlever l'excès de zinc et des métaux étrangers. C'est le plus simple que l'on puisse imaginer ; il présente cependant un certain nombre d'inconvénients, dont les principaux sont les suivants :

Les solutions de cyanure de potassium et d'or ne doivent pas renfermer de métaux précipitables par le zinc, cuivre, plomb, etc., qui viendraient souiller l'or.

Il faut employer du zinc très pur, les métaux étrangers se retrouvant dans l'or obtenu.

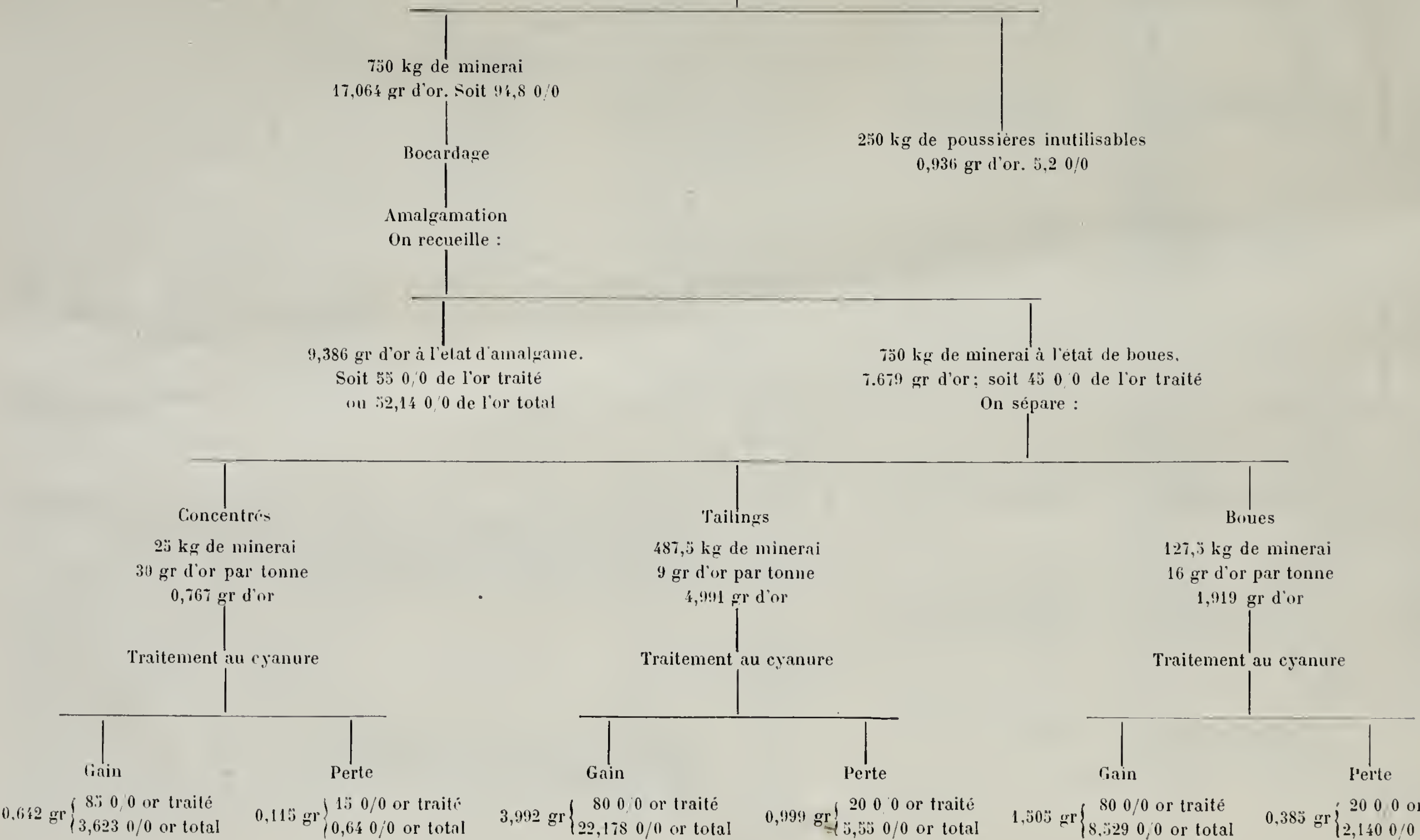
L'or ne se précipite bien que dans les solutions assez riches en cyanure, dont une partie est détruite par le zinc, d'où perte de zinc et de cyanure : c'est le principal inconvénient du procédé.

*Procédé Betty.* — Il est plus récent et consiste à remplacer le zinc par un couple plomb-zinc obtenu en plongeant rapidement la tournure de zinc dans une solution faible d'acétate de plomb.

On peut alors employer une solution plus étendue de cyanure de potassium ; mais les autres inconvénients ne sont pas évités.

La poudre obtenue est traitée par l'acide sulfurique et coupellée ensuite.

## TRAITEMENT DU MINERAI D'OR AU WITWATERSRAND



*Procédé Siemens et Halske.* — Dans ce procédé, l'or est extrait des solutions par électrolyse.

On emploie, comme cathode, du plomb, ce métal se laminant facilement ; l'or y est très adhérent et la séparation est aisée, puisqu'il suffit de fondre et de coupeller. La litharge obtenue

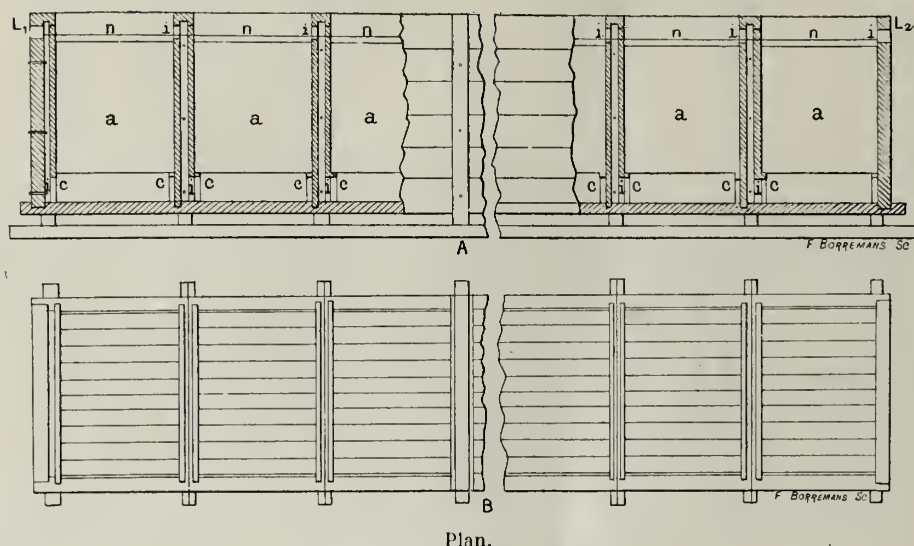



Fig. 111 et 112. — Electrolyseur Siemens et Halske pour l'extraction de l'or.

peut être ensuite traitée pour en retirer le plomb. Les frais sont, en somme, assez faibles et les avantages sur les autres méthodes considérables. Comme anode, on a employé le zinc ; mais on y a renoncé en raison de son prix élevé et il a été remplacé par du fer, bien meilleur marché. Les anodes sont entourées de toiles pour retenir le bleu de Prusse formé, lequel provient de la production

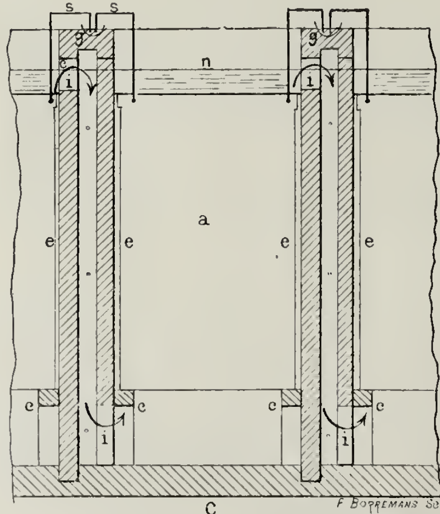



Fig. 113. — Electrolyseur Siemens et Halske pour l'extraction de l'or. Détail d'un élément.

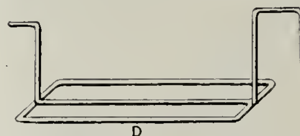



Fig. 114. — Electrolyseur Siemens-Halske. Support de cathodes.

de ferrocyanure dont la teneur dans la solution ne peut donc pas augmenter. Les anodes durent très longtemps, leur usure est proportionnelle à la quantité d'électricité. Le cyanure de potassium peut être en partie récupéré du bleu de Prusse.

Les cuves sont en bois (*fig.* 111, 112 et 113) et disposées de telle façon que le liquide sorte d'une cuve par la partie supérieure et arrive dans la suivante en passant entre les deux, dans une double paroi ménagée à cet effet ; en *i* se trouvent les ouvertures pour l'écoulement, en $L_1$ et $L_2$ l'entrée et la sortie. Les anodes sont suspendues à de petites tringles en fer, les cathodes également ; mais elles sont en trois séries (*fig.* 114) et formées de bandelettes de 4 cm de large et 1 m de longueur. Chaque appareil a 7 m de longueur, 1,5 m de largeur et 1 m de hauteur ; il est divisé en compartiments de 55 cm. Sur les parois des cloisons, on a perforé des trous, *g*, que l'on

remplit de mercure et par où se font les connexions *s*, *s*. Chaque compartiment renferme cinq anodes et six séries de cathodes.

La densité de courant est de 0,5 ampère par mètre carré d'électrodes, avec une tension aux bornes de 2 volts. L'or se dépose en couche adhérente sur le plomb. Tous les mois, les cathodes sont changées et remplacées par des neuves sans arrêter l'opération.

Le plomb obtenu tient de 2 à 12 0/0 d'or. L'alliage est enrichi en le soumettant à une sorte de liquation. A cet effet, on fait fondre à aussi basse température que possible; il s'écoule du

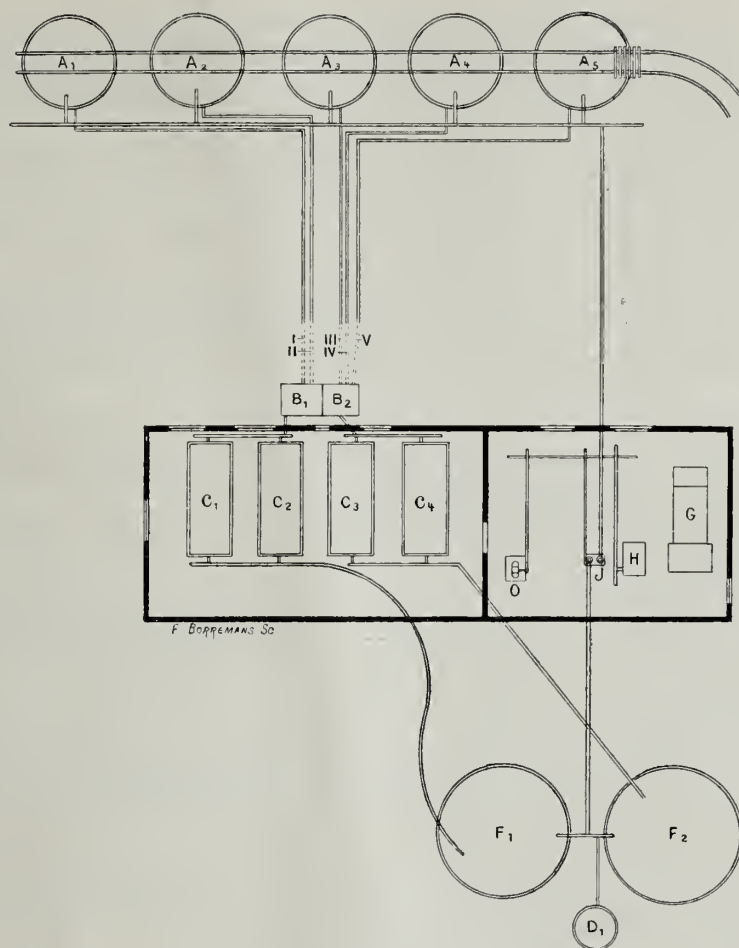



Fig. 115. — Plan d'une installation pour l'extraction de l'or par le procédé Siemens et Halske.

$A_1$-$A_5$. Cuves de lessivage ; — $B_1$ et $B_2$. Collecteurs ; — $C_1$-$C_2$. Cuves d'électrolyse ; — $D_1$. Réservoir à lessive ; — $F_1$-$F_2$. Réservoir à lessive ; — G. Chaudière à vapeur ; — H. Machine à vapeur ; — J. Pompe ; — O. Dynamo.

plomb pauvre et il reste un alliage aurifère très riche qui est fondu et coupellé. L'or obtenu titre 89 à 90 0/0 d'or ; il renferme de l'argent et 0,5 à 0,25 0/0 de plomb.

L'appareil décrit fonctionne avec 100 ampères et permet de traiter en 24 heures 50 m³ de solution.

La valeur de l'or extrait au Transvaal est annuellement de près de 250 millions de francs. Le procédé électrolytique est employé par 24 sociétés, utilisant une puissance de 455 chevaux pour 44 machines.

L'or extrait représente environ 85 0/0 de l'or total. Le tableau suivant donne la partie extraite pour chaque opération.

| | GAIN | | | PERTE | |
|---|---|---|---|---|---|
| | OR | 0/0 | | OR | 0/0 |
| Amalgamation | 9,386 | 52,140 | Poussières | 0,936 | 5,200 |
| Concentrés | 0,652 | 3,623 | Concentrés | 0,115 | 0,640 |
| Tailings | 3,992 | 22,178 | Tailings | 0,999 | 5,550 |
| Boues | 1,535 | 8,529 | Boues | 0,385 | 2,140 |
| | 15,565 | 86,470 | | 2,435 | 13,530 |

Total........................ 18 grammes.

L'Exposition du Transvaal. — Le Gouvernement du Transvaal et le Syndicat des Mines de Johannesburg avaient installé dans les jardins du Trocadéro une exploitation complète de minerai d'or.

Dans les sous-sols attenant à l'Exposition minière se trouvait une galerie d'extraction formée de véritable minerai importé du Transvaal ; ce minerai criblé était remonté à la surface du sol. Il était ensuite bocardé et amalgamé dans une salle spéciale. Les boues étaient ensuite cyanurées.

L'or était finalement retiré dans une pièce servant de laboratoire et où se trouvaient exposés les procédés Mac Arthur et Forrest, Betty et Siemens et Halske, dont l'installation avait été faite par « Siemens Electrolysis », de Berlin, exposant avec la « Rand Central Ore reduction C° Ltd », de Johannesburg.

Tous ces traitements se faisaient avec des appareils d'origine dont nous venons de donner la description. Sur les murs se trouvaient des tableaux permettant de suivre l'opération. L'or extrait représentait environ 200 francs par jour.

Devant le pavillon, une pyramide représentait, année par année, le volume de l'or extrait depuis la découverte des gisements.

Dans une salle spéciale se trouvait un plan en relief des environs de Johannesburg.

Affinage de l'argent. — *Procédé Mœbius.* — Il est basé sur le même principe que l'affinage du cuivre, mais on opère en milieu nitrique.

Les électrolyseurs sont des cuves en bois (pitchpin) ; ils sont séparés en plusieurs compartiments, généralement sept, et montés par dix en tension. A la mine de Pinos-Altos, les dimensions des bacs sont : longueur, 3,6 m ; largeur, 0,60 m, et hauteur, 0,5 m.

L'électrolyte est une solution étendue de nitrate d'argent acidulée par un millième d'acide nitrique.

Les anodes sont des plaques coulées de 20 × 25 cm et de 5 à 10 mm d'épaisseur ; elles sont placées dans des sacs en mousseline de coton paraffinée pour empêcher l'action de l'acide et tendues sur des cadres en bois, également imperméabilisés.

La partie insoluble de l'anode reste donc dans ces sacs et ne peut se mêler à l'argent. Ces anodes sont au nombre de trois par compartiment ; elles sont suspendues par des crochets à une tige métallique. Elles sont dissoutes en trente ou quarante heures, la densité de courant étant au début de 3 amp : $dm^2$ ; au fur et à mesure que la teneur en cuivre augmente dans la solution, on diminue cette densité de courant jusqu'à 2 amp : $dm^2$ et on augmente l'acidité jusqu'à 1 0/0. Suivant les conditions, la tension aux bornes est de 1 à 3 volts ; elle est, en marche normale, de 1,5 volt.

Les cathodes, au nombre de quatre par compartiment, sont de minces lames d'argent soudées à des tiges de cuivre ; elles sont légèrement huilées pour empêcher l'adhérence de l'argent précipité. Pour le recueillir, un cadre animé d'un mouvement de va-et-vient ou un jeu de brosses animées d'un mouvement vertical permettent de détacher l'argent qui tombe dans des boîtes plates, dont le fond perforé, est fixé d'un côté, par une chaînette et, de l'autre, par une charnière. L'usage des brosses permet d'éviter les courts circuits et de maintenir l'homogénéité du bain ; en outre, on peut rapprocher davantage les électrodes, car il n'y a pas à craindre les arbores-

cences produites par le métal déposé. L'ensemble des électrodes, agitateurs et boîtes, est fixé sur un treuil, de sorte que, chaque jour, il suffit, pour recueillir le métal, de soulever le tout, de faire tomber la boue égouttée dans une cuve à fond filtrant dans laquelle on le lave ; on le sèche ensuite, puis on le fond; il titre 999.

Dans les nouvelles installations, on remplace ces cathodes par une lame en argent sans fin, également huilée, sur laquelle le métal se dépose et est ensuite détaché au moyen de râcloirs. Le courant, amené au début des essais par des pointes de platine, l'est actuellement par des pointes d'argent, meilleur marché et plus conductrices. On recueille le métal de la même façon.

Lorsque le bain est très riche en cuivre, on le régénère en employant des anodes en charbon et faisant usage d'une faible densité de courant, de façon à ne déposer que l'argent; on remplace ensuite les cathodes en argent par des cathodes en cuivre et on augmente beaucoup la densité de courant et, par conséquent, la tension aux bornes, de façon que le cuivre se dépose rapidement à l'état pulvérulent. Le bain ainsi régénéré peut servir à nouveau après addition d'acide. Lorsque le courant ne passe pas, il faut retirer l'appareillage du bain pour éviter l'attaque des cathodes.

Ce procédé ne peut guère s'appliquer qu'à des alliages ne contenant pas plus de 5 à 10 0/0 de cuivre ; au cas contraire, on opère, comme pour l'affinage du cuivre, en employant comme électrolyte du sulfate de cuivre, mais en faisant le dépôt rapidement et recueillant le cuivre à l'état pulvérulent; les boues très riches en argent sont fondues, coulées en plaques et traitées comme précédemment.

Les boues d'affinage de l'argent renferment surtout de l'or, du platine, un peu de peroxyde d'argent, de plomb, d'antimoine, etc... ; elles sont séchées et fondues.

L'argent obtenu titre 999 à 999,5. L'or est traité par l'acide azotique bouillant pour enlever les traces d'argent qui restent; il est alors à 999. Si l'alliage renferme beaucoup de platine, comme celui provenant de l'extraction du nickel du Canada, on le dissout dans l'eau régale; le peu d'argent entraîné reste à l'état de chlorure que l'on sépare par filtration ; on précipite l'or par le sulfate ferreux et le platine par le chlorure d'ammonium. Le précipité de chloroplatinate calciné donne de la mousse de platine.

Le prix de revient de l'affinage de l'argent par ce procédé varie de 0,35 fr à 0,55 fr le kilogramme.

Ce procédé a été employé pour la première fois, en 1886, par la « Pennsylvania Lead C° » de Pittsburgh, qui traite journellement de 900 à 1 200 kg d'alliage.

L'usine de Perth-Amboy l'exploite depuis 1895 ; au début, elle utilisait la cathode sans fin ; mais elle y a renoncé en raison de la difficulté de séparer l'argent recueilli et est revenue au système primitif.

L'usine de Denver (Gold Smelting and Refining C°) emploie depuis 1898 la cathode sans fin préalablement graissée.

L'usine de Pinos-Altos traite de 100 à 125 kg; le prix de revient est de 0,51 fr par kilogramme ; elle emploie une puissance de 3,5 chevaux-vapeur (170 ampères, 8 volts).

La « Copper Canadian C° » exploite ce procédé pour retirer les métaux précieux, or, argent, et platine, des boues d'extraction du nickel et du cuivre provenant de mattes Bessemer.

Enfin il est employé, avec quelques variantes, dans un certain nombre d'usines, traitant leurs boues d'affinage du cuivre.

Affinage de l'or. — *Procédé Wohlwill.* — On emploie, comme électrolyte, une solution de chlorure d'or. Le métal précieux dissous à l'anode se dépose à la cathode, tandis que l'argent qui forme la principale impureté reste dans les boues anodiques à l'état de chlorure d'argent.

L'électrolyte est formé d'une solution de 20 à 30 gr de chlorure d'or et de 20 gr de chlorure de sodium par litre. Ce dernier sel ne doit pas être employé en plus grande quantité, sinon l'argent entre en solution et se dépose avec l'or. L'électrolyte renferme de 20 à 30 cm³ d'acide

chlorhydrique par litre, suivant la densité de courant employée. Celle-ci est considérable, de façon à activer l'opération ; d'ailleurs, d'après les recherches de l'auteur, on peut aller sans inconvénient jusqu'à 30 amp : $dm^2$ d'anodes. Dans ces conditions, une lame d'or de 4 mm d'épaisseur peut être dissoute en cinq heures; une lame de 4 kg représente 5 $dm^2$, soit 300 ampères (pour les deux faces). Dans la pratique, on marche à 100 ampères, soit 10 amp : $dm^2$, et on met quinze heures pour l'attaque d'une plaque analogue. On comprend qu'ici, plus encore que pour l'argent et le cuivre, la rapidité de l'opération ait son importance.

La tension aux bornes est de 1 volt et la température de 60-70°.

L'or se dissout en même temps que le platine et le palladium. L'iridium et les autres métaux du platine restent dans les boues. L'argent reste à l'état de chlorure, ainsi que le plomb en partie soluble à l'état de chlorure. S'il y a trop de plomb, le chlorure se dépose partout, sur la cuve, sur les électrodes ; on ajoute alors à la solution, de temps en temps, un peu d'acide sulfurique pour le précipiter. Le bismuth se dépose à l'état d'oxychlorure si l'acidité de la solution est insuffisante pour le maintenir à l'état de sel soluble.

Le dépôt anodique représente, en général, une portion assez forte du poids des anodes; il renferme généralement un peu d'or, provenant de la formation de protochlorure, lequel se dédouble en métal et perchlorure. Comme nous l'avons vu, une certaine quantité des impuretés se retrouve à l'état de chlorure; il en résulte un dépôt d'or équivalent et, par conséquent, appauvrissement de la solution en chlorure d'or. Quelles que soient les impuretés contenues dans l'électrolyte, le métal se déposera pur, sous la condition qu'il renferme suffisamment de chlorure d'or; il faudra donc remplacer celui-ci au fur et à mesure de sa disparition par du sel pur, que l'on introduit sous forme de solution destinée à compenser les pertes par évaporation au moyen d'un appareil à niveau constant.

Les cathodes sont en or laminé ; elles sont distantes de 3 cm des anodes et elles ont la même surface. Chaque électrolyseur en porcelaine ou lave comporte 9 paires d'électrodes suspendues à des barres de cuivre recevant le courant par deux cadres métalliques. Plusieurs bains sont montés en tension.

Il est à remarquer que les matières étrangères favorisent la qualité du dépôt ; la solution de chlorure d'or pur employée au début donne un dépôt spongieux et volumineux, dont la densité croît en même temps que la teneur de la solution en impuretés, de sorte qu'au bout d'un certain temps on obtient un dépôt en paillettes. Il faut donc, au début, pour éviter les courts circuits, augmenter la distance entre les électrodes.

Le dépôt râclé est recueilli et fondu ; il titre 999,8.

Ce procédé est employé à Hambourg, depuis 1880, par la « Norddeutsche Affinerie », qui traite par jour 75 gr d'alliage, avec un appareil d'une superficie de 6 $m^2$. La puissance nécessaire est inférieure à 2 chevaux (exactement 1,17 kilowatt ou 1,6 cheval).

Il est employé depuis 1900 par la Monnaie de Philadelphie, qui traite par jour 28 à 30 kg d'alliage.

Extraction de l'argent et de l'or des résidus. — *Procédé Dietzel.* — On peut facilement, par électrolyse, récupérer le cuivre et les métaux précieux contenus dans les résidus de toutes sortes, bijoux, galons, filés, passementerie, etc...

Le procédé Dietzel repose sur le principe suivant : On emploie, comme électrolyte, une solution de nitrate de cuivre légèrement acide ; les métaux, sauf l'or et le platine, se dissolvent à l'anode ; l'argent est ensuite précipité par le cuivre et celui-ci se dépose à la cathode.

L'électrolyseur est formé d'une cuve munie d'un double fond en matières non conductrices, sur lequel on place l'alliage coulé en plaques de 3 à 8 mm, auxquelles le courant est amené par un fil de platine. La surface de ce double fond est de 2 $m^2$ environ.

Le cuivre doit se déposer sur deux cathodes cylindriques, animées d'un mouvement de rotation ; elles sont légèrement graissées ou enduites de plombagine pour empêcher l'adhérence.

Entre les électrodes se trouve un diaphragme formé d'une simple toile de lin, dont le but est de retenir les fragments de cuivre qui pourraient se détacher de la cathode.

L'alliage obtenu de la fusion des objets de toutes sortes a une composition très variable, qui répond cependant le plus souvent aux limites suivantes :

| | |
|---|---|
| Cuivre | 40 à 65 0/0 |
| Argent | 22 à 50 0/0 |
| Or | 5 à 7 0/0 |
| Zinc, Plomb, Etain | Environ 5 0/0 |
| Cadmium, Platine, Nickel | Traces. |

Il n'y a, en général, que des traces de fer; cependant, quelquefois, les échantillons en contiennent des quantités notables.

Le résidu anodique renferme de l'or, du platine, de l'acide stannique, du nitrate basique d'étain, du bioxyde de plomb. On traite les boues par l'acide nitrique étendu, à l'ébullition; puis on dissout le résidu dans l'eau régale, on sépare par filtration l'acide stannique, le chlorure de plomb et le peu d'argent à l'état de chlorure ; dans la solution, on précipite l'or par le sulfate ferreux, puis le platine par du fer ou du chlorhydrate d'ammoniaque.

La densité de courant employée est de 1,8 amp : $dm^2$ et la tension aux bornes de 2,5 à 3 volts. Le liquide employé est peu conducteur ; il renferme 2 à 5 0/0 de cuivre et 0,05 à 0,4 0/0 d'acide libre ; il s'écoule, chargé d'argent, par la partie inférieure et revient, désargenté, à la partie supérieure de l'électrolyseur.

Lorsqu'il sort de l'appareil, il se rend dans une série de sacs à double fond percés de trous, renfermant au centre des barres de cuivre et sur les côtés de la tournure. Le liquide cède alors son argent, qui se trouve remplacé par une quantité équivalente de cuivre, soit environ 1 partie de cuivre dissoute pour 1 partie et demie d'argent précipitée. Le liquide sortant de ces appareils est à peu près neutre ; au cas où l'alliage contiendrait du fer, c'est à ce moment que l'on élimine ce métal entré en solution, à l'état de sous-azotate basique, par addition d'hydrate de fer et action d'un courant d'air.

Les liquides sont réunis dans un monte-jus et envoyés dans un réservoir où on complète après dosage la quantité d'acide nitrique nécessaire.

On perd ainsi 0,03 0/0 de l'argent traité ; le cuivre obtenu en renferme environ 1 gr par 10 kg.

Ce procédé est employé par l'Allgemeine Gold- und Silber-Scheide-Anstalt de Pforzheim (Allemagne), qui traite ainsi environ 60 kg d'alliage par jour. Le prix de revient du traitement est 1,25 fr environ par kilogramme.

Produits exposés. — La plupart des Sociétés exposant du cuivre électrolytique, Société Française des Métaux, Société des Cuivres de France, Fonderies et Laminoirs de Biache-Saint-Waast, Nichols Chemical C°, etc., présentaient également des lingots d'or et d'argent provenant de bains d'affinage.

Le Comptoir Lyon-Alemand exposait également, dans le Palais des Mines et dans la classe de la Bijouterie, de l'argent électrolytique à 1 000/1 000 sous formes diverses : planches, fils, barres, etc.

Argenture. — La maison Christophle, propriétaire des brevets de Ruolz, qui, on le sait, découvrit en France l'argenture et la dorure galvaniques en même temps que Elkington en Angleterre (1840), a eu pendant longtemps le monopole de l'argenture et, notamment, de la fabrication des couverts. Elle avait installé dans la classe 24, derrière son exposition, un petit atelier de dépôts électrochimiques. Nous croyons inutile de décrire ici ces opérations ; rappelons simplement que l'argenture s'applique plus spécialement au cuivre et à ses alliages. La première série d'opérations consiste à dégraisser et décaper les objets pour assurer l'adhérence et la continuité du dépôt. On dégraisse les pièces soit en les chauffant au four et, pour les petits objets, en les plongeant dans un bain de potasse caustique à l'ébullition. Dans le premier cas, les objets se recouvrent d'une couche d'oxyde que l'on détruit en plongeant les pièces encore chaudes dans de l'acide sulfurique à 10 0/0 (dérochage) ; on passe ensuite dans une série de bains acides : eau-forte

vieille, eau-forte neuve, acide à brillanter, acide à mater, etc. L'objet ainsi préparé est porté dans le bain de dépôt formé d'une solution de cyanure double d'argent et de potassium où il reste le temps nécessaire. Pour assurer la régularité du dépôt, les pièces sont suspendues à des cadres métalliques auxquels on imprime un mouvement de va-et-vient et qui servent à amener le courant. On emploie des anodes solubles en argent.

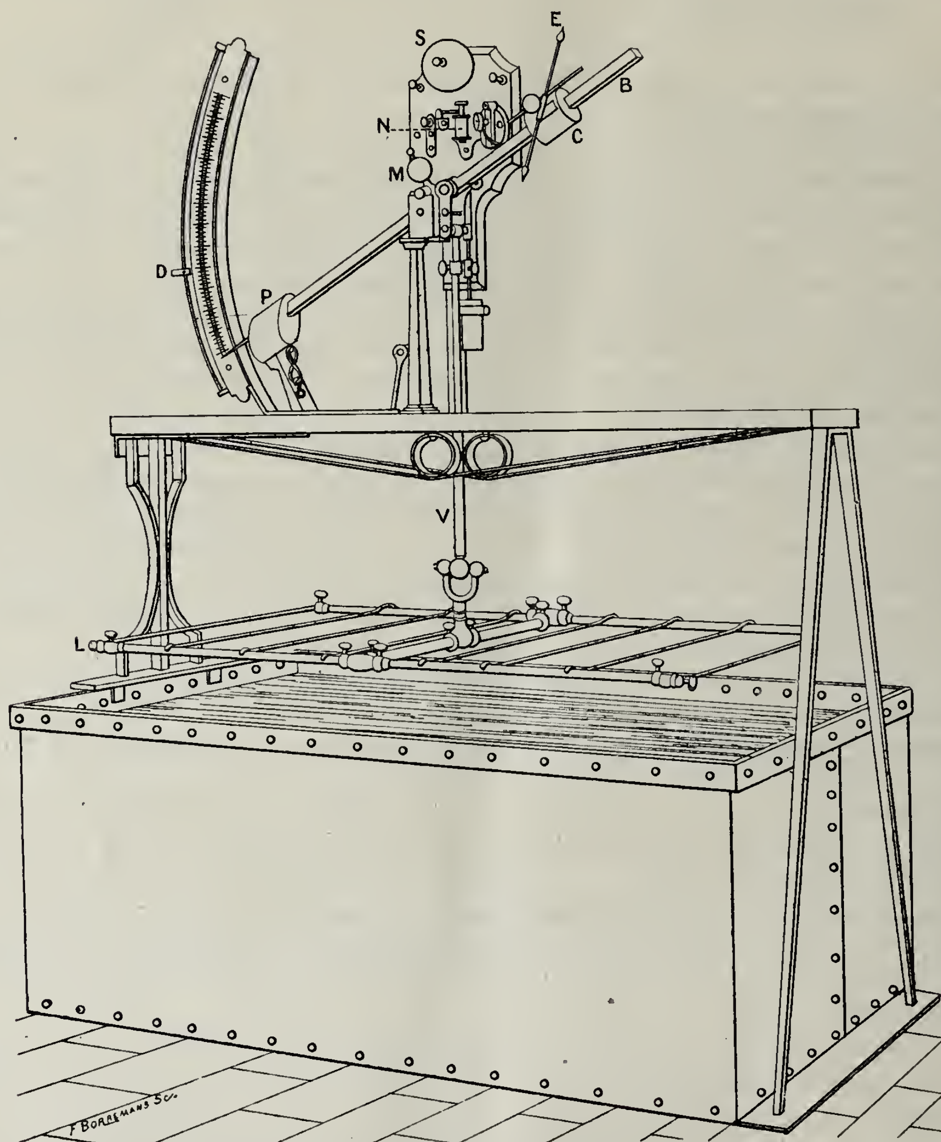



Fig. 116. — Balancier galvanogrammètre de M. Ducot.

L'objet sortant du bain est mat ; généralement on lui donne du brillant soit en le frottant avec des brosses en fil de laiton (gratte-brosse) montées sur tour et en finissant au moyen de drap imprégné de rouge d'Angleterre ou autres poudres à polir.

Étant données d'une part, la valeur de l'argent, d'autre part la vente des objets qui est réglée, en général, d'après le poids de métal précieux déposé, on emploie divers dispositifs permettant de connaître à tout moment quelle est cette quantité déposée ; les appareils utilisés à cet effet rompent le courant automatiquement dès que la quantité voulue de métal a été déposée.

Deux balances de ce genre figuraient à l'Exposition :

Le balancier galvanogrammètre de M. Ducot (*fig.* 116) est une balance romaine à deux contrepoids au lieu d'un. L'un de ces poids, P, est fixé sur le fléau B ; l'autre est mobile.

Le fléau est terminé par une aiguille qui se meut devant un cadran et indique en grammes la valeur du dépôt. Une petite sphère ajustable, M, permet de faire varier la sensibilité du fléau. Une tige E, dépendante du contrepoids C, permet de régler l'équilibre du début avec plus de sensibilité que le poids lui-même.

L'index D placé sur le cadran, au point correspondant au poids que l'on veut déposer, ferme, par son contact avec l'aiguille, le circuit d'une pile Leclanché, sur lequel est intercalé un électro-aimant dont l'armature déclenche l'interrupteur se trouvant sur le circuit du bac d'électrolyse. L'opération se trouve ainsi arrêtée, en même temps qu'une sonnerie S indique cette fin d'opération.

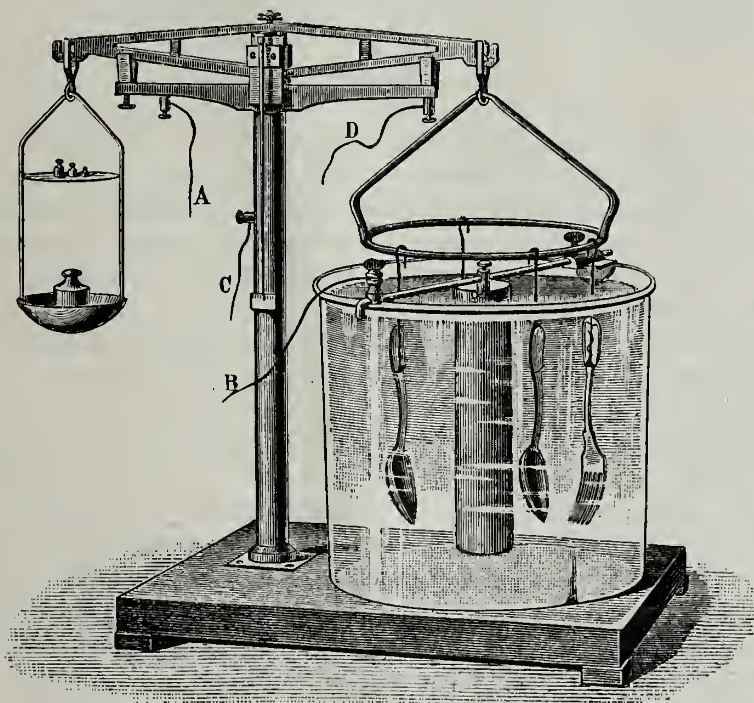



Fig. 117. — Balance argyrométrique.

La balance argyrométrique (*fig.* 117), exposée par la maison Delval et Pascalis, est une balance ordinaire, dont un des bras supporte le cadre où sont accrochées les pièces à argenter. Le courant est amené au cadre par l'intermédiaire du fléau, auquel est fixée une pointe plongeant dans un godet de mercure ; une fois l'équilibre fait, on dispose sur le plateau un certain nombre de poids représentant la quantité de métal à déposer (correction faite de la poussée du liquide), de sorte que, lorsque cette quantité de métal se trouve déposée, le fléau bascule et le courant se trouve coupé.

On tend de plus en plus, dans les maisons importantes, à utiliser des compteurs électriques de quantité.

Dorure. — La dorure galvanique fut découverte par de Ruolz et Elkington en même temps que l'argenture. Les procédés sont semblables à ceux de l'argenture avec cette différence que l'opération se fait à chaud, vers 60-70°, et, en général, avec une anode insoluble ; celle-ci est ordinairement formée d'une petite lame de platine et l'ouvrier règle le courant soit en faisant usage d'un rhéostat, soit en enfonçant plus ou moins l'anode insoluble.

Suivant les conditions, on obtient de l'or vert, de l'or rouge ou de l'or jaune ; en général,

on emploie des bains neufs pour faire la dorure jaune principalement sur argent; la dorure verte s'obtient avec un vieux bain riche en argent et la dorure rose ou rouge avec un vieux bain riche en cuivre; en outre, on modifie la teinte en variant la densité de courant, soit au moyen du rhéostat, soit au moyen de l'anode insoluble que l'on plonge plus ou moins. De plus, on peut mélanger ces teintes par des réserves appropriées et compléter l'ornementation, avec des vernis de couleur. On obtient ainsi ces magnifiques bijoux « art nouveau », qui de la bijouterie de luxe sont passés dans la bijouterie de fantaisie.

La maison Christophle et la maison Delval et Pascalis exposaient, dans la classe 24, un certain nombre de pièces dorées par électrolyse. Dans la classe de la Bijouterie et dans un certain nombre d'autres classes, un grand nombre de fabricants exposaient également des pièces dorées par ce procédé qui constitue actuellement une industrie très importante.

L'Exposition centennale d'Électricité renfermait un revolver, qui fut la première pièce dorée par Christophle, en 1842.

## NICKEL

L'extraction du nickel de ses minerais se fait généralement par voie ignée; mais on tend de plus en plus à retirer ce métal de mattes nickelifères dont on ne peut guère séparer le cuivre que par voie électrolytique. Le nickel restant en solution, la méthode électrolytique est tout indiquée; on effectue également l'affinage de ce métal, mais la branche d'industrie qui, dans cet ordre d'idées, a eu le plus grand développement est évidemment le nickelage.

Extraction du nickel. — *Procédé Titus Ulke.* — Le Canada fournit à peu près la moitié du nickel du monde entier, exploité actuellement par les seules mines et usines de la Canadian Copper C°. Le minerai consiste en un mélange de pyrrhotine (pyrite magnétique) et de chalcopyrite (pyrite de fer et de cuivre) empâtées dans une diorite.

La teneur moyenne de ce minerai est de 2,5 0/0 de nickel et 2,5 à 3 0/0 de cuivre. Le minerai, après extraction, est concassé, grillé en tas à ciel ouvert, puis transformé en matte de fusion contenant de 18 à 19 0/0 de cuivre et 10 à 15 0/0 de nickel, le reste étant formé presque exclusivement de soufre et de fer. Le produit est expédié à la « Orford Copper C° », à Constable Hook, New-Jersey (États-Unis), où la séparation plus complète des métaux est effectuée. En outre, la Canadian Copper C° a construit depuis peu, à Cleveland-Ohio (États-Unis), une usine pour le traitement direct des mattes Bessemer par le procédé Titus Ulke.

Ces mattes sont fondues en plaques pour former les anodes.

Leur composition est la suivante:

| | |
|---|---|
| Cuivre | 43,4 0/0 |
| Nickel | 40,0 0/0 |
| Fer | 0,3 0/0 |
| Soufre | 13,8 0/0 |
| Argent | 217 gr à la tonne |
| Or | 3 à 6 — |
| Platine | 15 — |

Les cathodes sont formées par des feuilles de cuivre. Un dispositif analogue à celui déjà décrit (p. 74) permet l'insufflation de l'air dans les cuves.

L'électrolyte est préparé en dissolvant une certaine quantité de mattes dans l'acide sulfurique dilué. On acidifie le bain de telle façon qu'il renferme 8 0/0 d'acide libre et on ajoute du sulfate d'ammoniaque, pour éviter la précipitation de l'arsenic et de l'acide chlorhydrique, pour retenir plus facilement l'argent dans les boues.

La première partie de l'opération est conduite comme s'il s'agissait d'affiner du cuivre les deux métaux entrent en solution; mais, comme le cuivre seul se dépose, l'électrolyte s'appauvrit en cuivre et s'enrichit d'une quantité équivalente de nickel; en même temps, la différence de potentiel aux bornes des électrolyseurs augmente peu à peu. Lorsque l'on arrive à

0,5 volt, la teneur en cuivre est très faible. On retire la solution et on précipite le cuivre restant au moyen de l'hydrogène sulfuré ou du sulfure de sodium. On sépare le fer par addition d'hydrate de fer et action d'un courant d'air et on précipite le nickel en solution neutre ou légèrement ammoniacale, en employant des anodes en plomb ou en charbon.

Les boues sont tamisées, traitées par l'acide sulfurique, filtrées, séchées, fondues et coulées en plaques.

Ces plaques sont affinées par le procédé Mœbius.

Affinage du nickel. — L'affinage électrolytique est peu employé par suite de la difficulté d'obtenir des plaques épaisses ne s'exfoliant pas. D'autre part, l'anode s'attaque très irrégulièrement, se casse dans le bain, de sorte que l'on est obligé de refondre près de la moitié de la masse traitée. Pour diminuer cet inconvénient, on doit employer des anodes en métal déjà relativement pur.

Deux usines font actuellement cette opération et produisent chacune environ une demi-tonne par jour. Ce sont la « Balbach Smelting and Refining C° », de Newark (New-Jersey), et la « Orford Copper C° », Constable Hook, New-Jersey (États-Unis). Cette dernière emploie des anodes à oreilles de 0,60 m de largeur, 0,85 m de hauteur et 0,02 m d'épaisseur. Les cathodes ont même surface; elles sont simplement recourbées à la partie supérieure pour être suspendues à des traverses servant à amener le courant. Des échantillons de ces électrodes figuraient dans l'Exposition des colonies anglaises, section du Canada (*fig.* 72-87, *l*, *m*, *n*).

Les produits de ces deux usines ont la composition suivante :

| | Anodes Orford | Anodes Balbach | Cathodes Balbach |
|---|---|---|---|
| Nickel......... | 95 à 96 0/0 | 95 à 96 0/0 | 99,5 à 99,7 0/0 |
| Cuivre......... | 0,2 à 0,6 0/0 | 0,5 à 0,6 0/0 | 0,1 à 0,2 0/0 |
| Fer............ | 0,75 | 0,75 | 0,1 |
| Silicium....... | 0,25 | 0,25 | |
| Soufre......... | 3,0 | 3,0 | 0,02 |
| Carbone........ | 0,45 | 0,45 | |
| Platine........ | 15 gr par tonne | 0,0 | 0,0 |

L'électrolyte employé est un bain de cyanure double obtenu en ajoutant un excès de cyanure alcalin à un sel de nickel.

L'Exposition du Canada était très importante; elle comprenait la série complète des minerais, des produits intermédiaires, des matériaux obtenus et même des objets ouvrés.

Nickelage. — Nous rappelons pour mémoire les échantillons de galvanoplastie de nickel, exposés par la maison Delval et Pascalis et les clichés typographiques en nickel de la maison Boudreaux (Voir p. 88).

Le nickelage a pris, dans ces dix dernières années, un développement colossal. Il s'applique surtout au dépôt sur fer, auquel il donne un éclat particulier et qu'il préserve de l'oxydation. Le développement de cette industrie a été arrêté pendant longtemps par suite de la difficulté d'avoir un dépôt adhérent, de consistance et de couleur convenable. Nous avons parlé plus haut de la difficulté d'obtenir ce métal en couche d'une certaine épaisseur.

Le traitement préalable du fer ne se rapproche nullement de celui du cuivre ; d'une façon générale, le décapage aux acides ne vaut rien. Pour le nickelage, il faut de toute nécessité employer le polissage : plus le polissage est fini, plus l'objet achevé est bien et moins l'avivage est nécessaire; le dépôt n'est adhérent que lorsque le fer est bien poli.

On arrive actuellement à de très bons résultats en cuivrant préalablement en bain de cyanure, passant ou non en bain de sulfate de cuivre et faisant enfin le nickelage.

Les bains de nickelage varient à l'infini : ils sont à base de sulfate de nickel, auquel on ajoute en général du sulfate d'ammoniaque. Le principal échec provient de ce que, l'anode soluble se dissolvant difficilement, le bain s'enrichit en acide sulfurique, lequel donne un dépôt terne; d'ailleurs, même avec une teneur faible en acide, le dépôt ne tarde pas à ne plus se pro-

duire. Pour éviter ces inconvénients, on ajoute au bain du citrate d'ammoniaque ou un autre sel à acide organique ; et de temps en temps on neutralise cet acide, soit par de l'hydrate, soit par du carbonate de nickel.

La maison Delval et Pascalis exposait quelques pièces nickelées et la maison Zipélius-Gaiffe en présentait une série considérable.

Le nickelage des petits objets a pris, dans ces derniers temps, un développement considérable ; mais on conçoit que la main-d'œuvre en était excessive, en raison de l'arrêt nécessité par l'accrochage et l'enlevage de ces menus objets ; aussi a-t-on cherché à supprimer ces manipulations en nickelant les objets directement placés en tas ; mais, pour éviter le non-recouvrement par le métal aux points de contact, il fallait agiter continuellement l'appareil ; encore n'avait-on qu'un résultat incomplet. On a alors imaginé le nickelage au tonneau. Dans ce procédé, les pièces à nickeler sont placées dans un tonneau tournant autour de son axe ; les avantages d'un pareil système sont que les pièces ainsi soumises à un mouvement de rotation les unes sur les autres sont uniformément recouvertes de métal ; de plus, elles subissent ainsi un polissage qui permet de supprimer l'avivage définitif, de façon que, lorsqu'elles sortent de l'appareil, elles ont simplement besoin d'être rincées et séchées et peuvent être livrées immédiatement. Un appareil de ce genre (*fig.* 118) existait dans l'exposition des Etablissements Grauer et Cie. Il se compose essentiellement d'une caisse hexagonale percée de trous, traversée par un axe métallique, portée par des montants en bois. Le mouvement de rotation est donné par une courroie fixée directement sur le tonneau, d'une part ; d'autre part, elle repose sur une poulie à laquelle on peut donner différentes vitesses. Le tout est fixé à une tringle métallique s'appuyant sur les montants de la cuve en pitchpin et est soutenu par un système de cordes et de poulies permettant de le retirer complètement du bain pour le remplissage.

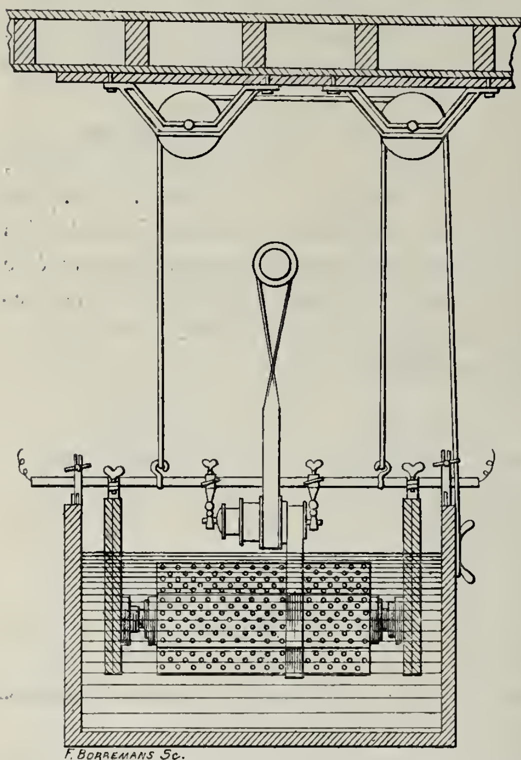


Fig. 118. — Tonneau de nickelage de la maison Grauer.

Les objets à nickeler sont placés dans le tonneau, qui ne doit être rempli qu'à moitié. Le courant est amené, par la tringle de support, à une tige traversant les montants en bois, puis, par l'axe du tonneau à une série de contacts placés à l'intérieur du tonneau. Les anodes sont placées sur les côtés de la cuve, comme dans le procédé ordinaire de nickelage.

Le bain employé doit être légèrement alcalin et avoir une densité de 8° à 10° Baumé ; sa température ne doit pas être inférieure à 15°-16°. Pour les petits objets, la vitesse de rotation est de 55 tours par minute ; dans ces conditions, ils sortent brillants, comme nous l'avons vu ; pour les objets à surface plate et de grandes dimensions, il ne faut pas tourner aussi vite ; on se contente de 3 à 5 tours par minute, mais ces objets nécessitent alors l'avivage.

Les établissements Grauer présentaient un certain nombre d'échantillons d'objets nickelés par ce procédé.

MM. Delval et Pascalis exposaient également des objets nickelés par un procédé analogue ; mais, pour éviter que les barres servant à amener le courant n'agissent comme cathode d'une

façon continue, un commutateur spécial permet de ne mettre en circuit que celles qui sont recouvertes des objets à nickeler.

La figure 119 représente une vue d'ensemble de l'appareil : on voit à droite le commutateur

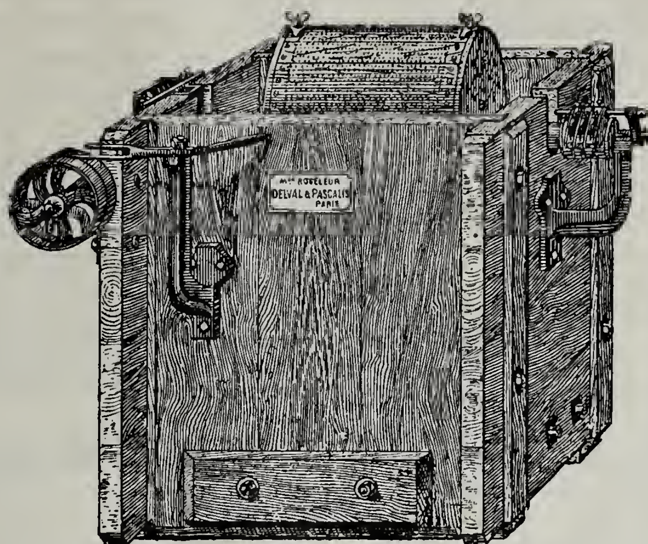



Fig. 119. — Tonneau de nickelage Delval et Pascalis. — Ensemble de l'appareil.

et à gauche la boîte renfermant l'engrenage qui permet de donner le mouvement de rotation au tonneau par l'intermédiaire de la poulie située en premier plan.

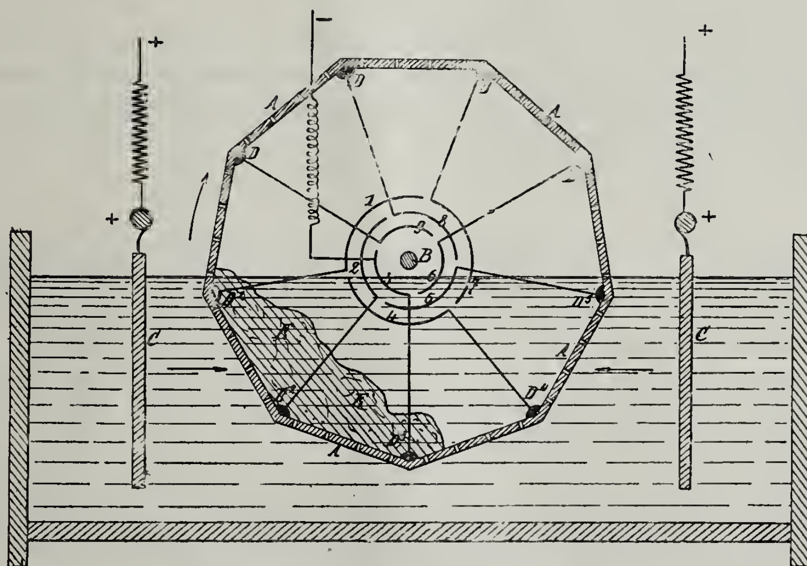
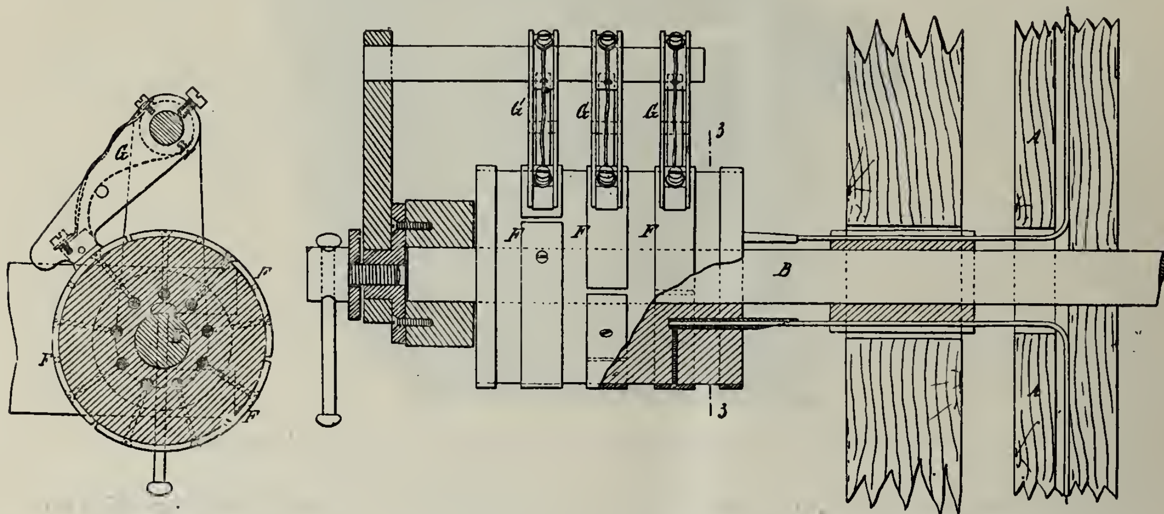



Fig. 120. — Tonneau de nickelage Delval et Pascalis. — Coupe schématique.

La figure 120 représente la disposition schématique de l'appareil. A est le tonneau proprement dit, à neuf faces, mobile autour de l'axe B. Les anodes sont en C, la cathode est fournie par les objets à nickeler, E, auxquels le courant est amené par des barres $D_1$, $D_2$, $D_3$, communiquant chacune avec une des touches d'un commutateur 1, 2, 3, etc., disposé de telle façon que trois de ces touches soient en relation avec le pôle négatif de la source, les touches 1, 2, 3, dans le cas présent, communiquant avec les barres $D_1$, $D_2$, $D_3$. L'inspection de la figure montre que, le

tonneau continuant son mouvement de rotation, la touche 3 ne sera plus en contact la première, mais sera immédiatement remplacée par la touche 4, puis la touche 2 sera remplacée par la touche 5 et ainsi de suite. Naturellement, comme le représente E, les objets n'occupent pas exactement le fond du tonneau, mais sont entraînés en raison du mouvement de rotation.

La réalisation du commutateur a été faite de la façon suivante (*fig.* 121 et 122). Il se compose de trois bagues F, coupées en trois et placées sur un cylindre, en déplaçant chaque segment de 40° par rapport au segment de la bague voisine. Trois balais G, placés dans le même plan




Coupe transversale. Vue de face, coupes partielles.

Fig. 121 et 122. — Tonneau de nickelage de la maison Delval et Pascalis. Détails du commutateur.

amènent le courant aux trois bagues et chaque segment communique avec une des tiges $D_1$, $D_2$, etc. Chaque balai G est muni d'un frottoir en cuivre maintenu par un ressort contre la bague correspondante. Naturellement ces dispositifs pourraient s'appliquer à d'autres genres de dépôt, par exemple à l'électro zincage.

## ZINC

L'extraction du zinc a donné lieu à un grand nombre de recherches ; mais les résultats obtenus ne sont pas encore très brillants. Les conditions ne sont plus les mêmes, en effet, que dans le cas du cuivre : le métal a beaucoup moins de valeur ; il faudrait donc que les frais de traitement fussent beaucoup moins élevés ; or c'est précisément l'inverse qui a lieu.

En ce qui regarde l'extraction du métal de ses minerais, question qui n'est pas encore résolue, il est vrai, pour le cuivre, il n'y faut guère songer pour le zinc, ses minerais n'étant pas du tout conducteurs, à moins d'essayer des méthodes détournées.

A l'inverse du cuivre, le zinc ne se dépose bien que lorsque la densité de courant cathodique est considérable ; d'autre part, la chaleur de formation des sels de zinc est beaucoup plus élevée que celle des sels de cuivre : la différence de potentiel aux bornes et, par conséquent, la dépense d'énergie sera, pour ces deux raisons, considérable.

Recherches sur l'électrolyse des sels de zinc. — La difficulté que présente la précipitation électrolytique des sels de zinc a eu pour résultat de donner naissance à un grand nombre de recherches. Le zinc, en effet, tend à se déposer sous forme spongieuse et inutilisable par conséquent ; or, ce qu'il importe d'obtenir, c'est un métal pouvant directement être laminé et travaillé sans refonte préalable, d'autant plus que l'éponge de zinc s'oxyde très facilement.

Pour avoir un bon dépôt de zinc, il faut une grande densité de courant, sinon le dépôt est spongieux et on obtient un fort dégagement d'hydrogène à la cathode.

La qualité du dépôt varie également avec la température et d'une façon assez considérable.

Enfin, il importe de remarquer l'état d'acidité de la solution. Les oxydes qui se forment par la décomposition de l'eau sont cause de la production de zinc spongieux. L'éponge de zinc obtenue par voie électrolytique renferme toujours de l'oxyde de zinc ou un sel basique. Ce zinc spongieux, en effet, laisse un résidu lorsqu'on le dissout dans le mercure ; de plus, cette formation d'éponge de zinc est provoquée par les agents oxydants. Une solution de sulfate de zinc donnant un dépôt de zinc uni et blanc fournit immédiatement un dépôt spongieux si on y ajoute 0,01 0/0 d'eau oxygénée ou 0,1 0/0 d'azotate de zinc.

De même, certains métaux qui facilitent l'oxydation du zinc, tels que le cuivre, l'antimoine, l'arsenic, donnent naissance à un dépôt spongieux s'ils se trouvent en solution.

Le zinc ne se déposant à l'état spongieux que lorsqu'il peut y avoir formation d'oxyde, on peut en conclure que, pour avoir un bon dépôt, il faut opérer en solution acide.

Il faut également éviter le trop grand excès d'acide qui donne un dégagement d'hydrogène très abondant à la cathode, de sorte que le dépôt a peu de cohésion par suite des bulles emprisonnées. En outre, l'acide libre favorise la solubilité des impuretés de l'anode. On maintien l'acidité constante par addition d'acide, ce qui a l'inconvénient d'exiger une certaine surveillance et augmente la teneur de l'électrolyte en sels métalliques. Il est plus simple d'employer une électrode insoluble supplémentaire, calculée de telle façon qu'elle compense la perte d'acidité.

Extraction du zinc. — *Procédé Hœpfner*. — On électrolyse une solution de chlorure de zinc, obtenue en traitant une solution de sulfate, par des eaux-mères du procédé Solvay. L'électrolyse se fait à chaud dans des électrolyseurs spéciaux munis de diaphragmes en cellulose nitrée. Les anodes sont en charbon. Les cathodes rotatives, dans les conditions où elles sont établies, évitent le dépôt de zinc spongieux et les autres inconvénients des procédés préconisés pour l'extraction du zinc par électrolyse.

On peut obtenir 5 kg de zinc et 15 kg de chlorure de chaux par cheval-jour. On peut même arriver à 16 kg de zinc par l'emploi d'un dépolarisant, en transformant un sel au minimum en sel au maximum ; mais, dans ce cas naturellement, on n'obtient pas de chlorure de chaux.

Le zinc obtenu titre 99,9-99,95. Il ne renferme pas d'arsenic. Le procédé a été employé d'abord à Fuerfuhrt (Allemagne) en 1897 ; en 1898, cette usine a produit 700 tonnes.

On l'utilise également dans l'usine Brunner, Mond et Cº de Northwich (Angleterre), qui produisait, en 1898, 400 tonnes. Cette dernière usine exposait un bel échantillon de zinc, obtenu par ce procédé, dans la section anglaise des produits chimiques. Elle livre au commerce un produit donnant à l'analyse :

| | |
|---|---|
| Zinc | 99,988 0/0 |
| Fer | 0,0076 |
| Plomb | 0,0034 |
| Cuivre | 0,001 |

Électrozincage. — On a donné le nom de galvanisation, nom impropre s'il en fut, à l'opération consistant à recouvrir le fer préalablement décapé d'une couche de zinc, obtenue en plongeant l'objet dans un bain de ce métal en fusion. La couche obtenue est cristalline, irrégulière, grossière; mais le procédé coûte excessivement bon marché. On a pensé déposer également le zinc par électrolyse ; la dépense est plus considérable, mais le dépôt est plus régulier, homogène ; de plus, on peut recouvrir des pièces plus fouillées et même l'intérieur de longs tubes, tels que ceux employés dans les chaudières.

Actuellement, les chaudières des maisons Belleville, Normand, Thornycroft..., sont, en grande partie, électrogalvanisées. Ces procédés sont devenus pratiques depuis 1895 ; mais de grandes améliorations ont été faites, depuis, pour rendre le procédé automatique. Comme pour tout dépôt électrolytique, l'opération consiste à dégraisser, décaper, neutraliser et recouvrir d'un dépôt de métal, en employant des anodes solubles. En général, c'est au fer que s'applique l'électrozincage.

Le dépôt de zinc électrolytique possède l'avantage suivant : le zinc précipité, même en

couche extrêmement mince, présente des irrégularités et des solutions de continuité aux endroits du métal où se trouvent des pailles, craquelures, etc., qui pourraient échapper à l'examen. Cela permet donc de contrôler la qualité des pièces à recevoir. C'est pour cette raison que l'électrozincage des tubes de chaudières marines est exigé par l'Amirauté anglaise et la Marine française.

*Décapage du fer.* — Le décapage du fer est particulièrement délicat ; ce métal est, en effet, recouvert la plupart du temps d'une couche d'oxyde salin (oxyde des battitures, en terme de métier : calamine) excessivement adhérente et très dure, sur laquelle les agents mécaniques et chimiques n'ont que peu d'action. Dans les petites installations, le décapage se fait à la main, soit au sable, soit aux acides. Dans les grandes installations, on emploie le décapage aux acides ou le décapage au sable et à l'air comprimé.



Fig. 123. — Collecteur d'écailles à leur sortie du bain.

*Décapage aux acides.* — En général, on se contente de décaper dans une solution à 1, 2 ou 3 0/0 d'acide sulfurique commercial. L'Amirauté anglaise exige que tous les tuyaux d'acier des navires, les chaudières, les tubes collecteurs et toutes les plaques soient décapées dans l'acide chlorhydrique à 5 0/0, jusqu'à ce qu'il ne reste plus tracé de l'oxyde noir et des scories formées pendant la fabrication. Les plaques doivent être placées dans le bain sur le côté et non à plat ; quand elles sont retirées de la solution acide, toutes les surfaces doivent être brossées et lavées avec soin, mises dans un bain d'eau fraîche et finalement rincées sous un jet d'eau.

On se contente souvent de rincer les pièces dans un lait de chaux ou dans une solution alcaline, puis de les laver à grande eau.

Le décapage par les acides est long et coûteux ; la dépense d'acide est considérable, car les battitures ne se détachent que lentement et se dissolvent peu à peu dans l'acide qu'elles usent inutilement.

Pour remédier à cette usure de l'acide, M. Cowper-Coles a imaginé un collecteur magnétique de battitures, qui n'est autre chose qu'un électro-aimant muni de points conséquents dans le but d'étendre, autant que possible, le champ magnétique. Pour éviter l'attaque, l'appareil est enveloppé dans une gaine en cuivre, il est relié au circuit d'électrolyse et consomme 6 volts et 10 ampères. On le promène dans les cuves et il réunit ainsi les écailles en suspension et celles qui ne sont plus que peu adhérentes. De temps en temps, l'appareil est retiré du bain et l'oxyde est enlevé en rompant le circuit ou en frottant avec une brosse ou un racloir.

Un de ces appareils figurait dans l'Exposition anglaise (groupe V, Électricité) ; la figure 123 en représente un sortant du bain et garni de battitures.

On réalise ainsi une économie considérable. Dans les grands électrolyseurs, on peut disposer plusieurs de ces collecteurs.

M. Cowper-Coles emploie également l'action du courant pour faciliter le détachement des battitures, en opérant avec un bain chaud à 1 0/0 d'acide sulfurique et renversant de temps en temps le sens du courant au moyen d'un commutateur spécial. Au bout de dix minutes environ, les écailles sont toutes détachées ; on les enlève alors au moyen du collecteur.

Un autre procédé, employé à l'usine de Teplitz (Bohême), consiste à employer comme électrolyte du sulfate de sodium à 20 0/0, de sorte que l'alcali produit au pôle négatif dégraisse la plaque, tandis que l'acide produit au pôle positif la décape. On opère avec une densité de courant de 0,6 à 1,2 amp : dm² et une différence de potentiel de 4 volts. Il y a formation d'hydrate de fer que l'on peut recueillir en faisant circuler le liquide et le filtrant. Ce procédé s'applique aux autres métaux et permet ainsi de récupérer le métal provenant de l'attaque, lorsqu'il a une certaine valeur.

*Décapage au sable.* — Le décapage à la main se fait en frottant les objets avec un chiffon humide imprégné de sable; il est très imparfait et très onéreux. On ne l'emploie que dans les petites installations.

L'emploi de l'air comprimé facilite beaucoup l'opération, la rend plus rapide, plus propre et plus économique.

L'installation (*fig.* 124 et 125) comprend un compresseur d'air, A (à 0,7 kg : cm²), qui l'envoie par un tube B dans un récipient C, d'où on peut le diriger dans la soufflerie D où se trouve le sable; celui-ci, entraîné par le courant d'air, est dirigé, au moyen d'une lance E, sur les objets à décaper, placés dans une chambre spéciale F, dont le fond perforé, G, permet de recueillir le sable au moyen de trémies H. Lorsque les trémies sont pleines, un tuyau d'aspiration I entraîne le sable dans un appareil pour le tamisage de l'air J, d'où on peut le retirer de temps en temps pour le renvoyer dans la soufflerie. Le réglage du débit de l'air comprimé et du sable se fait au moyen de deux soupapes L, commandées de la chambre de décapage.

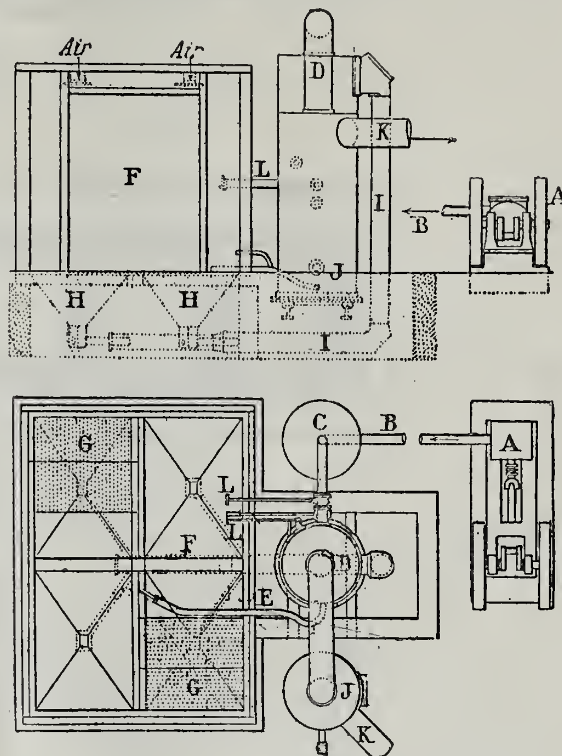


Fig. 124 et 125. — Décapage au sable d'objets en fer pour l'électrozincage.

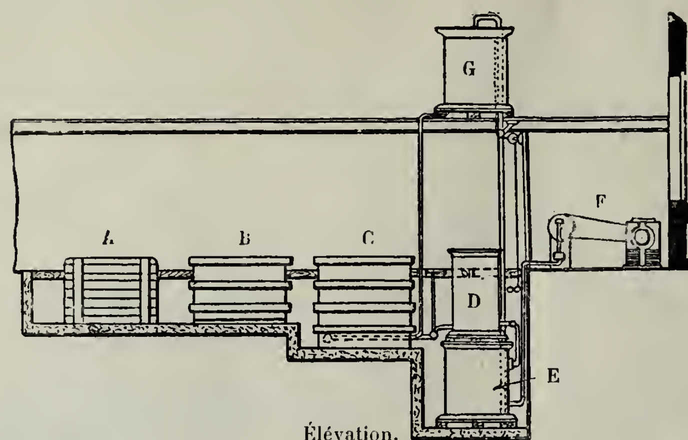
On peut employer soit du sable quartzeux, dont la perte est de 10 0/0 environ à chaque passage, ou plus simplement une fine grenaille de fonte trempée dont la perte est insignifiante, la matière traitée restituant ainsi les 9/10 de la perte apparente. Lorsque les pièces sont de grandes dimensions, elles sont montées sur un chariot qui se déplace d'une façon continue dans la chambre de décapage et sont attaquées de chaque côté par un jet de sable.

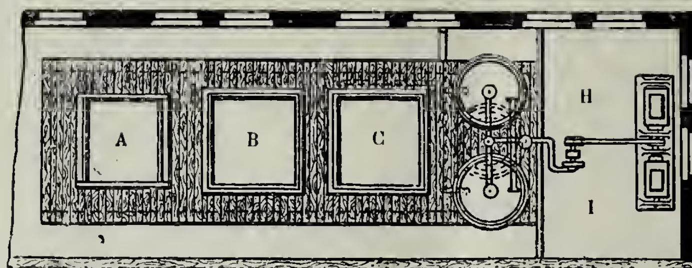
D'une façon générale, pour le fer, le décapage au sable est le plus avantageux et celui qui donne les meilleurs résultats ; il permet même de supprimer l'opération du dégraissage.

*Mode opératoire.* — M. Cowper-Coles emploie des anodes insolubles en plomb, de sorte que l'acidité du bain augmente d'une façon continue; cette acidité ne gêne pas lorsqu'elle ne dépasse pas une certaine limite ; lorsqu'elle devient trop considérable, on régénère l'électrolyte en le filtrant à travers des déchets de zinc; on a ainsi une tension aux bornes plus élevée; mais la dépense d'énergie est compensée par l'économie résultant de l'emploi de déchets de zinc et la simplification de la main-d'œuvre de ce fait.

L'installation (*fig.* 126 et 127) comprend : une cuve de décapage A, une cuve de lavage B, auxquelles on peut ajouter : cuve de passage à l'eau de chaux, cuves de passage à la soude, cuve de rinçage, etc... La cuve de galvanisation est en bois ; l'électrolyte renferme environ 250 gr

de sulfate de zinc par litre d'eau ; il circule d'une façon continue par un système à air comprimé.




Plan.

Fig. 126 et 127. — Installation d'une usine d'électrozincage.

Le liquide sort de l'électrolyseur C par la partie supérieure et se rend dans un récipient D, où

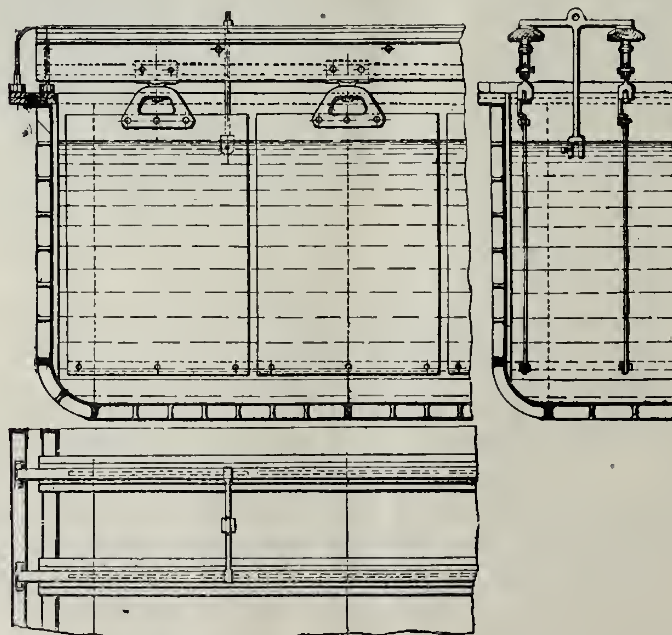


Fig. 128, 129 et 130. — Montage des électrodes dans une cuve d'électrozincage.

il s'accumule pour se rendre dans le réservoir E ; entre les deux se trouve une soupape de retenue. Lorsque E est plein, le liquide est envoyé en G par l'air comprimé au moyen du

compresseur F actionné par le moteur 1, puis revient dans la cuve d'électrozincage à la partie inférieure et du côté opposé à celui par où il est sorti. La manœuvre se fait automatiquement au moyen d'un robinet à trois voies fixé à la conduite d'air comprimé et commandé par un flotteur situé dans le réservoir G. Lorsque celui-ci est vide, le flotteur dirige le robinet de façon que l'air soit comprimé en E et fasse monter le liquide, la soupape de retenue l'empêchant de retourner en D; pendant ce temps, le liquide qui sort de l'électrolyseur s'accumule dans ce dernier bassin. Lorsque G est plein, le flotteur fait manœuvrer le robinet à trois voies de façon que l'air n'aille plus dans E, qui peut alors se remplir du liquide accumulé en D; pour utiliser l'air comprimé, on l'envoie alors dans la cuve de zincage où il maintient la solution agitée.

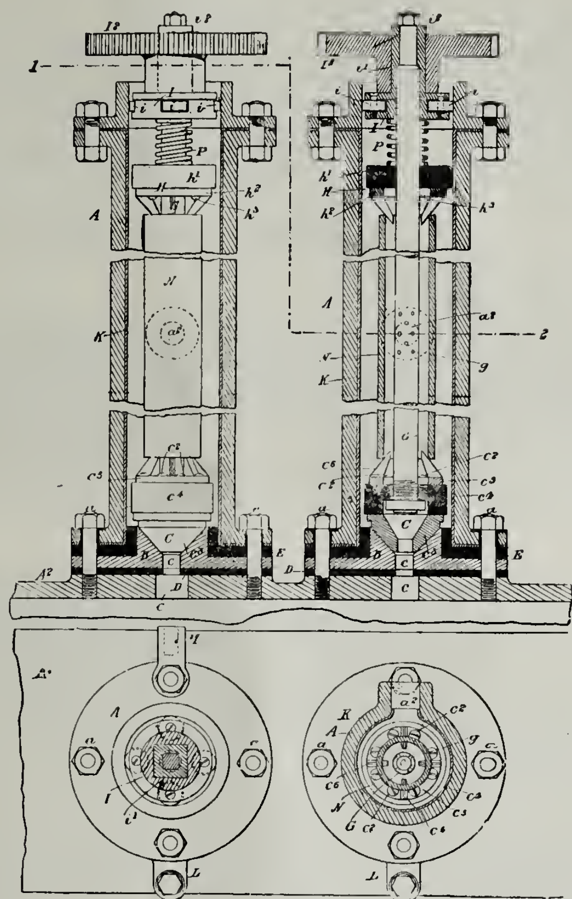


Fig. 131 et 132. — Cuves d'électrozincage pour tubes.

C'est dans la cuve G que se fait la régénération de l'électrolyte. Ces cuves portent un châssis en bois recouvert de paillassons sur lesquels on étend une couche de coke concassé; au dessus on place des déchets de zinc ou du gris de zinc. L'électrolyte, qui est devenu très acide, se trouve neutralisé; mais, comme nous l'avons vu, il faut toujours laisser une certaine acidité. Pour déterminer si l'acidité est convenable, l'ouvrier chargé de la conduite de l'opération fait de temps en temps des dosages de la façon suivante : Dans un vase pouvant être bouché, de 250 cm³ environ, on introduit 200 cm³ d'électrolyte; puis on dissout dans un peu d'eau chaude une capsule de gélatine contenant la quantité d'alcali nécessaire pour neutraliser l'acidité de 200 cm³ de solution renfermant 0,6 gr d'acide sulfurique par litre; on ajoute les eaux de lavage, puis une quantité déterminée, 2 cm³ par exemple, d'une solution de lacmoïde. On agite; si la solution est bleue, elle ne renferme pas assez d'acide; il faut en ajouter avant de l'employer et

faire un nouveau titrage. Si la solution est violette, elle est bonne ; si on a une coloration rouge, la solution est trop acide ; dans ce cas, on refait un nouvel essai, en dissolvant, outre la capsule de gélatine correspondant à 0,6 gr par litre, une plus petite renfermant de l'alcali correspondant à 0,3 gr par litre (200 $cm^3$). Si la coloration est bleue, la solution est également utilisable ; si elle est rouge, elle doit être passée dans le régénérateur, car elle est trop acide.

Le montage des électrodes est indiqué sur les figures 128, 129 et 130.

Au cas où l'on désire zinguer des tubes de chaudière, on doit déposer une couche de métal à l'intérieur et à l'extérieur du tube ; le dispositif suivant est alors adopté.

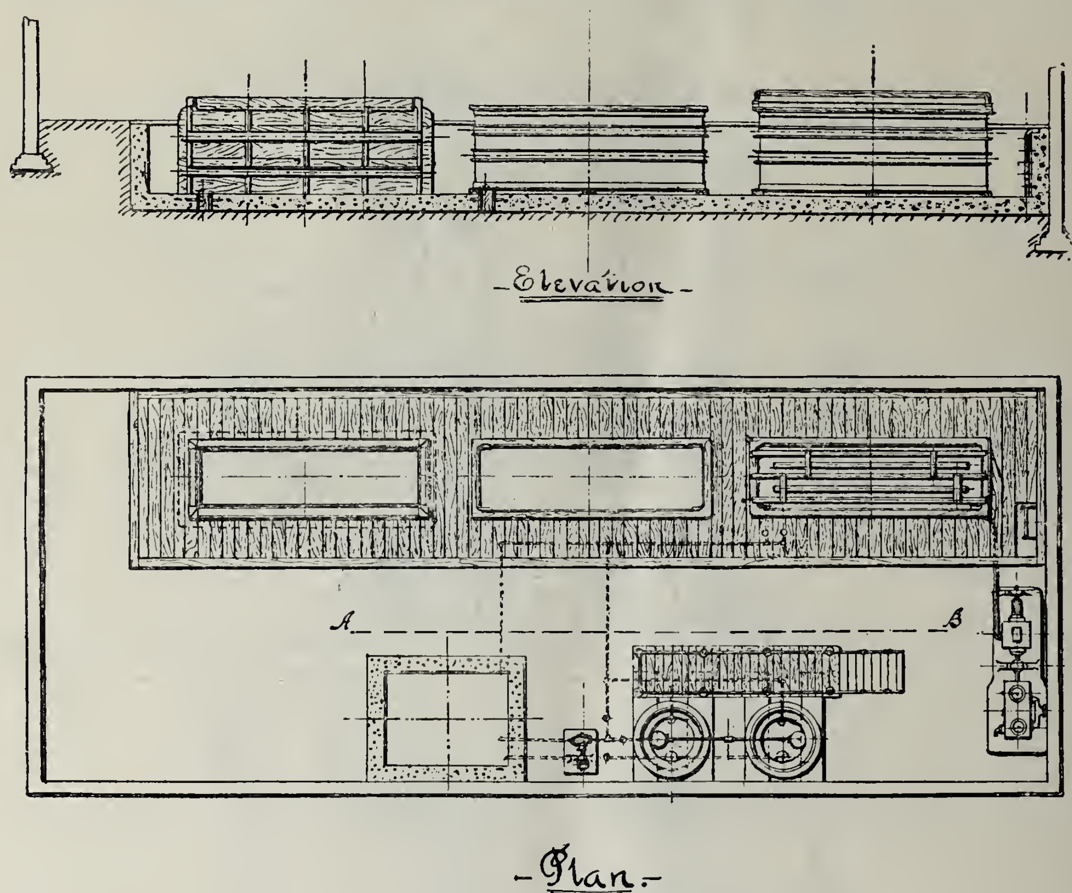



Fig. 133 et 134. — Schéma de l'installation d'électrozincage de la « Germania Shipbuilding and Engineering C° ».

On emploie une cuve tubulaire A (*fig.* 131 et 132) doublée de plomb K, servant d'anode externe ; le tube à zinguer N est supporté au moyen de dents par un système disposé spécialement ; à la partie supérieure, un système assez analogue le supporte ; le tout est traversé par une barre de fer doublée de plomb G servant d'anode interne.

Les figures 133 et 134 donnent le schéma de l'installation d'électrozincage de la « Germania Shipbuilding and Engineering C° ».

Les figures 135 et 136 représentent partie des installations d'électrozincage de MM. Maudslay fils et Field, à Greenwich, et de la « Thames iron works and Shipbuilding C° ».

M. Cowper-Coles exposait, à côté de réductions d'appareils que nous signalions plus haut, des échantillons de toutes sortes d'objets en fer ou acier, recouverts de zinc par électrolyse, et notamment des tubes, des plaques, des feuilles, etc. ; un certain nombre de ces objets avaient été martelés, tordus, brisés, pour montrer l'adhérence du dépôt de zinc.

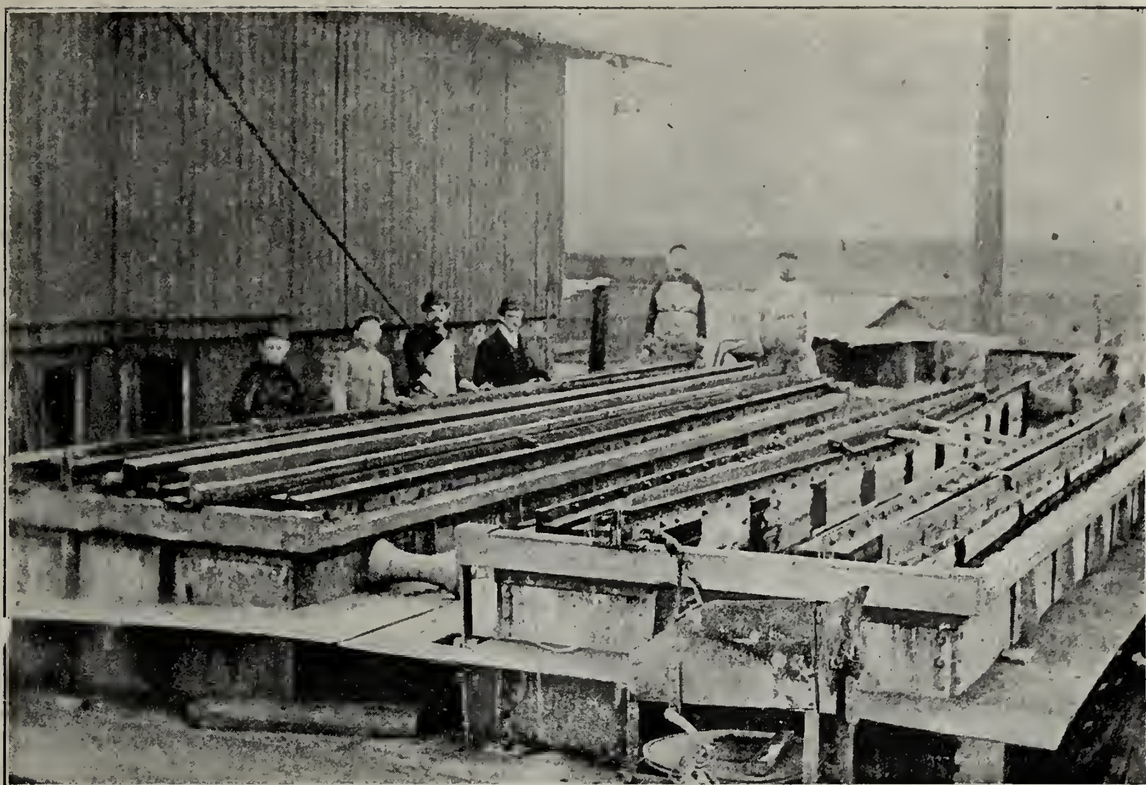


Fig. 135. — Installation d'électrozincage de l'usine de MM. Maudsley fils et Field, à Greenwich.



Fig. 136. — Vue des cuves d'électrozincage de la « Thames iron works and Shipbuilding C° ».

La maison Delval et Pascalis exposait également des tubes d'acier recouvert de zinc par électrolyse ; dans les installations qu'elle fait, le bain est à base de sulfate et on utilise une anode soluble ; l'acidité est réglée par l'emploi d'un certain nombre d'anodes insolubles en plomb. Parmi ces installations, il faut citer notamment celle des usines « la Gallia », à Suresnes, et celle des usines d'Escaut-et-Meuse, à Anzin, qui fabriquent le tube pour chaudières marines.

La maison Siemens et Halske et la Compagnie Française des Métaux exposaient également des tubes de chaudières recouverts de zinc par électrolyse.

### PLATINE

Le dépôt électrolytique de platine paraissait devoir jouer un grand rôle en électrolyse pour la confection d'électrodes inattaquables, que le prix élevé du platine rend de plus en plus indispensables. Malheureusement le métal déposé est toujours plus ou moins spongieux, plus ou moins grenu, aussi est-il très facilement attaqué par le chlore à peu près sans action sur le métal poli. Les électrodes en métal platiné ne sont jusqu'à présent d'aucun usage ; elles coûtent encore relativement cher et, une fois l'attaque commencée, elles sont inutilisables ; leurs déchets n'ont qu'une valeur insignifiante par rapport à celle de la façon de l'électrode.

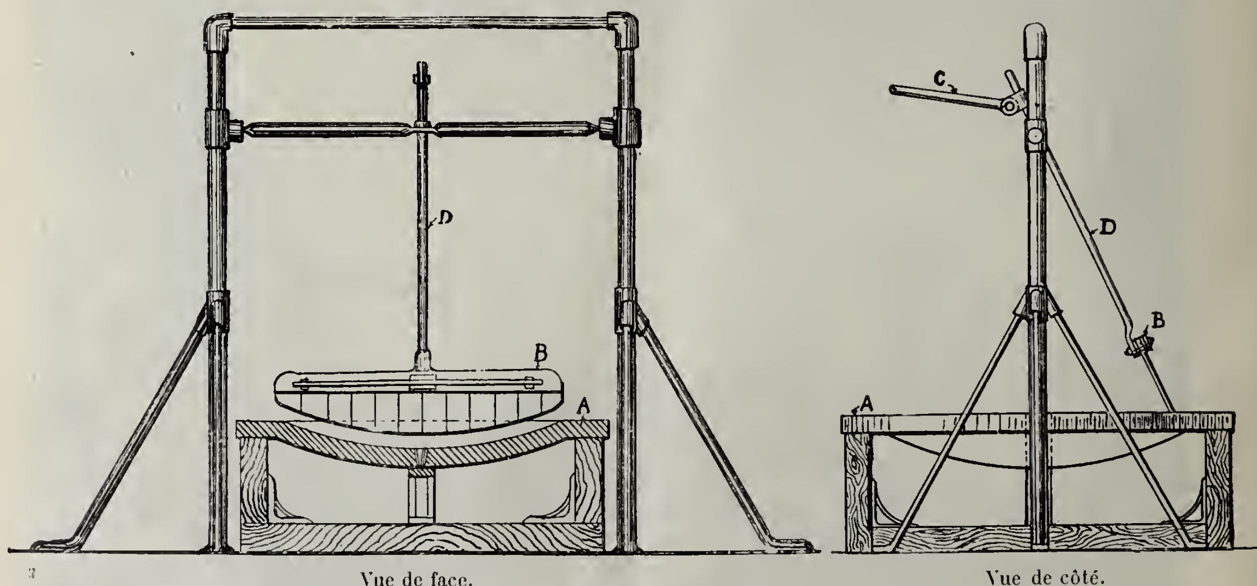
Le bain de platinage est formé de chlorure de platine et de pyrophosphate de sodium. On emploie une anode en platine qui est insoluble, de sorte qu'il faut entretenir le bain en chlorure.

La maison Delval et Pascalis exposait des objets de petite bijouterie platinés par ce procédé.

L'Exposition centennale d'Électricité renfermait des dépôts de platine obtenus par MM. A. et Ed. Becquerel en 1844-1862.

### PALLADIUM

Le palladium peut être employé au lieu de platine ; il se dépose très bien ; il coûte, il est vrai, plus cher que le platine ; mais, sa densité étant deux fois moindre, il y a compensation.




Vue de face. Vue de côté.

Fig. 137 et 138. — Appareil pour le palladiage des miroirs obtenus par le procédé Cowper-Coles.

On recouvre de palladium les miroirs obtenus par le procédé Cowper-Coles ; à cet effet, la partie qui ne doit pas être recouverte est vernie pour empêcher le dépôt.

Le miroir est ensuite décapé dans un bain alcalin de cyanure de potassium et ajusté dans une pièce en poterie ; le tout est placé sur un support en bois.

L'anode (*fig.* 137 et 138), reliée à un bâti par une tige ajustable D, est formée d'une pièce B, dans laquelle sont fixés, au moyen de plaques en plomb, des charbons taillés de façon que la section corresponde à celle du miroir à recouvrir. La tige D, supportée par une traverse, est articulée à l'autre extrémité avec une tige C, attachée à un disque animé d'un mouvement de rotation.

Ce disque porte une fente radiale, dans laquelle le pivot de la tige C est ajusté, de sorte qu'en augmentant ou raccourcissant la distance entre le pivot et le centre du disque, le jeu de la tige est régularisé. Les bornes sont attachées au miroir formant cathode et au pivot du support de la tige D.

Pendant l'opération, l'anode est agitée d'un mouvement de va-et-vient d'arrière en avant pour régulariser l'épaisseur de la couche de palladium à la surface du miroir et empêcher le dépôt de matières étrangères sur la surface du réflecteur.

L'électrolyte est formé d'une solution de chlorure double de palladium et d'ammonium à 6,2 gr par litre et de chlorure d'ammonium à 10 gr par litre. La température est de 25° et la densité de courant de 0,027 amp : $dm^2$. La tension aux bornes du bain est de 4 à 5 volts.

Un dépôt de 0,5 gr par décimètre carré suffit pour avoir un bon revêtement protecteur.

MM. Delval et Pascalis exposaient également des objets palladiés dans un bain de chlorure de palladium et de pyrophosphate de sodium.

## ÉTAIN

Extraction de l'étain. — Le traitement électrolytique n'a pas encore été appliqué aux minerais d'étain, faciles à traiter par la voie sèche ; mais il est employé depuis un certain temps pour le désétamage des déchets de fer-blanc.

On a essayé l'emploi de divers électrolytes ; mais les bains alcalins, additionnés ou non de sels, donnent les meilleurs résultats, car ils n'ont pas, comme les bains acides, l'inconvénient d'attaquer également le fer. Les déchets sont employés directement comme anodes en les plaçant dans des paniers perforés. Un certain nombre d'usines travaillant d'après ces procédés ont été installées en Allemagne, notamment à Essen, où les frères Goldschmidt, exposant dans la Collectivité allemande de l'Industrie chimique, traitent par jour de 50 à 60 tonnes de déchets.

Etamage électrolytique. — La maison Delval et Pascalis exposait des tubes de cuivre recouverts électrolytiquement d'étain, intérieur et extérieur, par l'emploi d'un bain à base de chlorure d'étain et de pyrophosphate de sodium.

## CADMIUM

Ce métal peut être déposé par voie électrolytique avec différentes compositions de bains. On peut le déposer à l'état d'alliage avec l'argent en bain de cyanure de potassium renfermant des cyanures de cadmium et d'argent, dans des proportions variant de 4 à 1 jusqu'à 7 à 1, suivant que l'on veut avoir un dépôt de cadmium de 10 à 80 0/0. La densité de courant peut varier de 0,8 à 1 amp : $dm^2$. La teneur limite du bain en métal peut varier de 20 à 30 gr par litre pour le cadmium, et de 3 à 10 gr pour l'argent.

Les alliages ainsi obtenus ont les propriétés de l'argent, mais avec une plus grande dureté. Des échantillons étaient exposés par M. Cowper-Coles.

## CHROME

Des essais d'affinage électrolytique du chrome avaient été faits aux établissements Krupp d'Essen, dans le but d'obtenir un métal exempt de carbone. Cette question a beaucoup moins d'actualité, en raison des procédés alumino-thermiques de Goldschmidt. M. Cowper-Coles exposait des échantillons obtenus dans l'électrolyse d'une solution de chlorure de chrome à 8,25 0/0 en opérant à chaud avec une densité de courant de 4 à 5 amp : $dm^2$.

## VANADIUM

M. Cowper-Coles exposait des échantillons de vanadium déposé par voie électrolytique.

## TRAITEMENT DES MINERAIS COMPLEXES

Il existe un certain nombre de minerais formés de sulfures complexes d'une assez grande richesse, mais malheureusement inexploitables en raison du grand nombre de métaux jusqu'à présent impossibles à séparer économiquement. Le principal de ces minerais est celui de Broken-Hill (Australie), qui forme des montagnes entières et qui a jusqu'à présent résisté à toutes les attaques des chercheurs et des métallurgistes.

Voici, à titre d'indication, l'analyse d'un échantillon :

| | |
|---|---|
| Plomb | 30,05 |
| Zinc | 23,77 |
| Argent | 0,06 |
| Manganèse | 0,93 |
| Fer | 3,91 |
| Soufre | 18,96 |
| Alumine | 1,2 |
| Silice | 20,05 |
| Oxygène, traces d'or, arsenic | 1,07 |
| | 100,00 |

Les éléments dominants sont donc le plomb et le zinc.

Un certain nombre de procédés ont été proposés pour le traitement des minerais complexes, notamment ceux de Watt, Diffenbach, Ashcroft, Siemens et Halske, Hœpfner, Mohr, Swinburne, etc., dont la plupart ont été essayés sans succès ou végétaient sans donner de résultats sérieux.

M. Cowper-Coles a proposé également un procédé qu'il exposait sous forme de tableau schématique, en représentant chaque produit isolé par un échantillon en nature du même produit et en quantité proportionnelle.

Les opérations employées sont les suivantes :

1° Grillage du minerai dans un four spécial;

2° Lessivage à l'eau pour enlever le sulfate de zinc, puis à l'acide sulfurique étendu pour enlever le reste du zinc également à l'état de sulfate ;

3° Déposition du zinc métallique ou à l'état d'éponge sur des cathodes d'aluminium;

4° Fabrication de blanc de zinc ;

5° Lessivage des résidus à la soude caustique pour enlever le plomb;

6° Dépôt du plomb;.

7° Production de blanc de plomb de la solution de plombite de sodium ;

8° Production de litharge;

9° Lessivage et dépôt de l'argent.

## DIVERS

Électrogravure. — Le procédé par érosion consiste à employer la planche, recouverte de cire ou de laque, dont les parties à enlever ont été mises à nu, comme anode dans un bain approprié. On obtient par ce procédé des planches analogues aux planches à l'eau-forte, en employant pour le cuivre un électrolyte à base de sulfate de cuivre. L'avantage de ce procédé est que les traits sont très nets et qu'il n'y a pas de rongeage sous la cire. Dans le cas de planches d'acier, on utilise comme électrolyte une solution de chlorhydrate d'ammoniaque. Ces procédés sont employés notamment en cartographie.

Ce procédé ne peut donner que des dessins plats et non des figures plastiques. M. Rieder exposait dans la section allemande d'électricité un appareil destiné à tourner la difficulté.

La figure 139 donne le principe du procédé :

Prenons un récipient renfermant du chlorure d'ammonium faisant fonction d'électrolyte et dans lequel plonge un bloc de plâtre portant l'empreinte du relief à graver. Sous ce bloc de plâtre, imaginons une spirale en fil de fer plongeant dans le liquide et faisant fonction de cathode. Sur le côté en relief du bloc de plâtre vient s'appliquer la plaque d'acier à graver qu'on relie avec le pôle positif. Elle forme ainsi l'anode.

La plaque d'acier se trouve donc en présence de la surface en relief du plâtre imprégné de liquide par porosité et la plaque d'acier ne sera en contact avec le liquide qu'aux points saillants du relief. Si on fait passer le courant, le fer se dissout aux points de contact, leur nombre

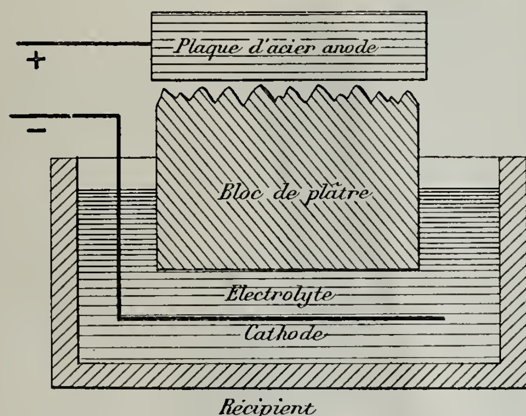



Fig. 139. — Principe de l'appareil d'électrogravure.

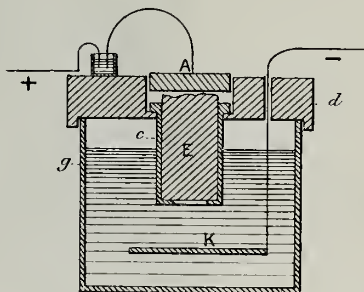



Fig. 140. — Montage d'électrogravure.

augmente donc peu à peu et l'opération est achevée dès que tous les points de la surface de la plaque sont en contact avec le modèle. Ce procédé est simple en apparence ; mais un grand nombre d'obstacles se sont mis en travers de son exécution. C'est ainsi que la diffusion se faisait difficilement dans le bloc de plâtre ; le liquide d'imprégnation s'appauvrit en chlorure ; de plus, l'acier renferme des parties insolubles et notamment du carbone, qu'il faut éliminer au fur et à mesure de l'attaque.

Ajoutons enfin qu'il a fallu créer un dispositif permettant de déplacer le moule pour ce nettoyage et un autre permettant de changer le moule, car il est nécessaire de le remplacer de temps en temps.

Un certain nombre de modèles furent construits successivement. Celui figurant à l'Exposition (*fig.* 141) y fonctionnait tous les jours.

Le modèle de plâtre, fixé dans un châssis en fonte au moyen de deux vis coniques, reposait sur une table mobile dans le sens vertical, mue par un excentrique. Sur cette table mécanique, se trouve la plaque servant de châssis à la pièce de métal à graver. Cette plaque est mobile. En outre, au moyen d'un dispositif spécial, on peut la disposer dans un plan exactement parallèle à celui du modèle. Derrière la table, un chariot portant une brosse à mouvement circulaire, également actionnée par l'excentrique, passe entre le modèle et la plaque d'acier et nettoie ainsi cette dernière. Pendant ce temps, la brosse reçoit un filet d'eau en même temps que l'on fait courir sur le modèle un rouleau imbibé qui lui apporte du liquide électrolytique frais et rend uniforme la distribution de ce liquide que le soulèvement a fait un peu suinter. Comme nous l'avons vu, cette précaution est nécessaire, l'électrolyse ne se produisant pas d'une façon régulière avec ce modèle poreux.

L'opération s'effectue de la façon suivante : la table mobile place le modèle sur la plaque d'acier et des dispositions sont prises pour que la superposition ait lieu sans choc, par

un intermédiaire élastique. Le modèle reste environ quinze secondes en contact, puis est écarté. C'est à ce moment que le nettoyage a lieu. Le chariot à brosse s'étant retiré, le modèle vient s'appliquer de nouveau et l'opération est répétée. Il a fallu porter particulièrement son attention sur le moyen d'appliquer doucement le modèle, en le préservant contre la pression.

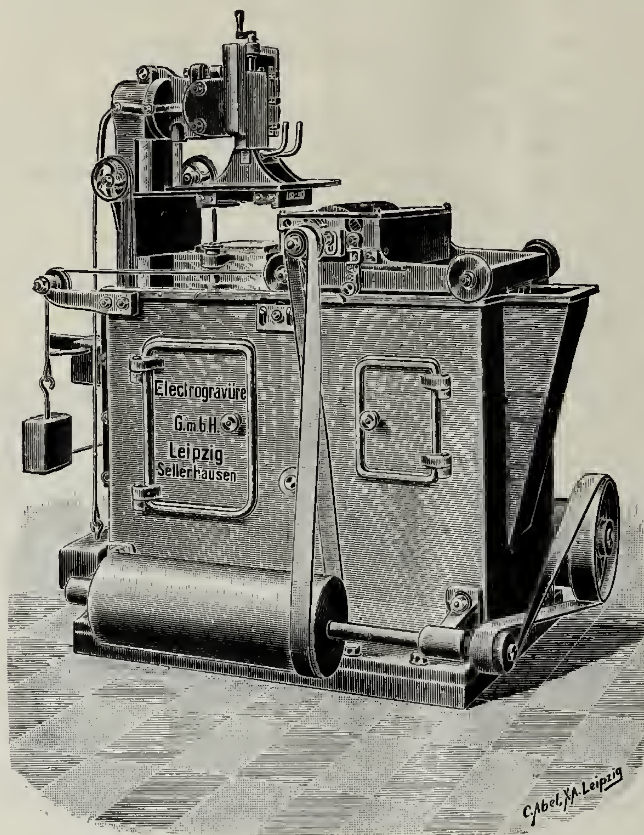



Fig. 141. — Appareil d'électrogravure.

A la machine est adjoint un dispositif pour mouler les modèles, de façon qu'ils soient absolument pareils entre eux et puissent être facilement repérés.

La tension nécessaire est de 12 à 15 volts. L'intensité du courant se règle d'elle-même par l'étendue du contact momentané et, pour des plaques de dimension 20 $\times$ 30 cm, comme celles que permet d'utiliser la machine, on atteint 50 ampères si l'attaque embrasse toute la surface.

## B. — *ÉLECTROMÉTALLURGIE PAR FUSION IGNÉE*

---

### GÉNÉRALITÉS

Avantages et inconvénients. — L'électrolyse par fusion ignée ne s'applique qu'aux sels assez facilement fusibles, peu volatils, peu décomposables par la chaleur et agissant le moins possible sur les électrodes. Les sels halogénés (chlorures ou fluorures), quelquefois les alcalis, sont ceux qui se prêtent le mieux à cette action. Il ne faut pas songer aux sulfates, qui sont détruits à haute température et dont la plupart sont infusibles, ni aux azotates, qui attaquent très énergiquement le charbon des anodes au point que l'action peut être dangereuse.

L'électrolyse par fusion ignée est assez limitée ; on ne l'a que peu employée encore pour les produits chimiques qui ne se prêtent, en général, pas à ce mode de préparation ; elle est assez restreinte pour les métaux, à cause des difficultés de l'opération, de son prix élevé, de l'action des sels fondus, du chlore à haute température sur les appareils, des électrodes, etc.

Le zinc, par exemple, présente l'avantage d'avoir un chlorure très bon conducteur, remplissant bien les conditions de fusibilité du sel et du métal, mais possédant l'inconvénient d'exiger des frais d'évaporation et de dessiccation considérables, qui ne sont pas en rapport avec le prix peu élevé du métal. Des essais ont cependant été tentés dans cet ordre d'idées.

On ne peut donc guère employer ce mode d'obtention que pour des métaux d'un prix assez élevé, tels le sodium, le magnésium et l'aluminium, qui valaient, il y a une quinzaine d'années, 25, 200 et 80 francs le kilogramme. Étant donné le bon marché de la matière première employée pour chacun de ces trois métaux, il y avait donc, au début, une grande marge pour le prix de revient et, malgré la baisse des prix, le bénéfice fut encore considérable et il est certain que les procédés par lesquels on extrait ces trois métaux n'auraient pu entrer en ligne de compte si leurs prix avaient été plus bas à cette époque. Aujourd'hui, les procédés électrolytiques sont les seuls employés et, actuellement, les prix de ces métaux sont dans le voisinage de 3, 32 et 3 francs.

Il n'y a, en général, qu'une seule réaction produite ; on n'a donc pas la perte due aux actions secondaires et, notamment, à l'électrolyse de l'eau qui, dans certains cas de la voie humide, est considérable. Le rendement chimique en quantité est donc, en général, excessivement élevé. Par suite de cette absence de réaction secondaire, on peut augmenter considérablement la densité du courant et, par conséquent, la production relative des appareils.

Par contre, les appareils sont assez coûteux, l'entretien et les frais de réparation considérables.

La résistance électrique des sels fondus est quelquefois très grande ; les sels halogénés du glucinium, par exemple, ne sont pas conducteurs ; aussi, en raison de la grande densité de courant que l'on emploie, la différence de potentiel aux bornes est, le plus souvent, très élevée.

Comme conséquence de cette différence de potentiel très élevée, le rendement calorifique sera considérable ; aussi, dans la plupart des électrolyses par fusion ignée, l'énergie dépensée sous forme de chaleur suffit pour maintenir le bain liquide sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir une source de chaleur étrangère.

Température de l'électrolyse. — La température du bain est un facteur excessivement important. Si nous considérons les points de fusion du métal et de l'électrolyte et le point d'ébullition du métal, nous aurons :

| MÉTAL | ÉLECTROLYTE | POINT DE FUSION | | POINT DE VOLATILISATION |
|---|---|---|---|---|
| | | ÉLECTROLYTE | MÉTAL | |
| Mg | Carnallite | 500° | 420° | Au-dessus de 1100° (métal). |
| Na | Chlorure de sodium | 790° | 96° | Au rouge vif (900°) (métal). |
| Al | Cryolite | 675° | 625° | » |
| Al | Chlorure double | 185° | 625° | Au-dessous de 625° (électrolyte). |
| Li | Chlorure double | 380° | 180° | » |

On voit donc, d'après ce tableau, que l'électrolyse de la carnallite ne présente pas de difficulté, l'électrolyte et le métal fondant presque au même point et le magnésium se volatilisant beaucoup plus haut. Dans le cas de l'électrolyse du chlorure de sodium, l'opération sera plus délicate, car il faudra éviter de perdre du métal par volatilisation, le point indiqué correspondant au point de fusion de l'électrolyte. D'autre part, on admet que plus la température est élevée, plus on facilite la formation de sous-chlorures, ce qui implique un rendement de plus en plus mauvais ; on cherchera donc à baisser le point de fusion en ajoutant du chlorure de potassium. Dans l'extraction de l'aluminium par Bunsen, le bain, très fusible, était volatil avant le point de fusion du métal ; celui-ci était donc obtenu à l'état pulvérulent ; pour l'avoir en lingot, il fallait le fondre avec du chlorure de sodium.

## SODIUM

On peut retirer le sodium :

- A l'état métallique :
  - Électrolyse du chlorure : Appareil Borchers. Appareil Grabau.
  - Électrolyse de la soude : Appareil Castner.
- A l'état d'alliage avec le plomb : Procédé Vautin. Procédé Hulin.
- A l'état d'amalgame : Procédé Castner-Kellner.

Les procédés d'extraction du sodium à l'état d'amalgame sont donnés pour mémoire. Ils ne sont pas intéressants dans le cas présent, car il est pratiquement impossible d'en retirer le métal en nature par suite des quantités considérables de mercure à distiller, l'alliage à 3 0/0 étant déjà solide. A l'état d'alliage avec le plomb, il semble encore difficile de retirer le métal par distillation, il est peu probable que ce procédé soit économique.

L'extraction directe du métal réussit, au contraire, parfaitement. Les appareils Borchers et Grabau ne sont pas utilisés, en raison des inconvénients que présente l'électrolyse du chlorure de sodium ; par contre, le procédé Castner est employé dans plusieurs usines et sert à préparer actuellement la presque totalité du sodium.

Cette industrie a pris naissance il y a une quinzaine d'années et avait pour objet l'extraction de l'aluminium par action du sodium sur la cryolithe (procédé Castner). Malgré les résultats obtenus, la préparation de l'aluminium par les procédés chimiques dut être abandonnée en raison de sa préparation directe par voie électrolytique. Le sodium ne peut être employé pour obtenir la soude par action directe sur l'eau ; son prix est encore trop élevé ; d'ailleurs, comme nous l'indiquons, c'est généralement la soude qui sert de matière première. Par contre, on peut l'utiliser dans la fabrication de certains produits, tels que : oxyde et bioxyde de sodium, cyanure double de potassium et de sodium, etc.

Le procédé Castner. présente l'inconvénient de partir d'une matière première chère, la soude caustique; par contre, il a l'avantage de permettre d'employer des appareils tout en métal, sans crainte de les voir rapidement détériorés, comme dans le cas de l'électrolyse des chlorures.

L'appareil (*fig.* 142) se compose d'un vase de fusion en fer A, dans lequel la cathode C est introduite par le fond, au moyen d'une tige B amenant le courant. Pour éviter les fuites, un tube D fait suite à ce fond ; il est rempli de soude caustique non fondue, qui forme joint hermétique. La soude est maintenue en fusion dans le vase A par un procédé de chauffage quelconque, en général une rampe de gaz. L'anode E est fixée au couvercle F, isolé du vase par de l'amiante. Cette anode, de forme cylindrique, entoure la cathode. Entre les deux électrodes se trouve une toile métallique suspendue à un manchon en fer, G. Le sodium se trouve à la partie supérieure du liquide dans ce manchon collecteur. Les gaz se dégagent soit par le trou H, soit par le couvercle I, incomplètement fermé.

Le métal est recueilli au moyen d'une cuiller percée de petits trous que traverse l'alcali, mais que ne peut franchir le métal.

Le sodium est préparé, aux États-Unis, par la « Niagara Electrochemical Cy », à Niagara-Falls; en Angleterre, par la « British Aluminium Cy », à Oldbury; en Allemagne, par la maison Meister-Lucius et Bruning à Hochst-am-Main et par l' « Electrochemische Fabrik Natrium », de Rheinfelden, et « l'Electrochemische Werke », de Bitterfeld, ces deux dernières Sociétés étant des filiales de la Chemische Fabrik Griesheim-Elektron de Francfort-sur-le-Mein. Toutes ces usines emploient le procédé Castner, plus ou moins modifié. Seules les maisons allemandes ont exposé dans l'Expo sition collective allemande de l'Industrie chimique.

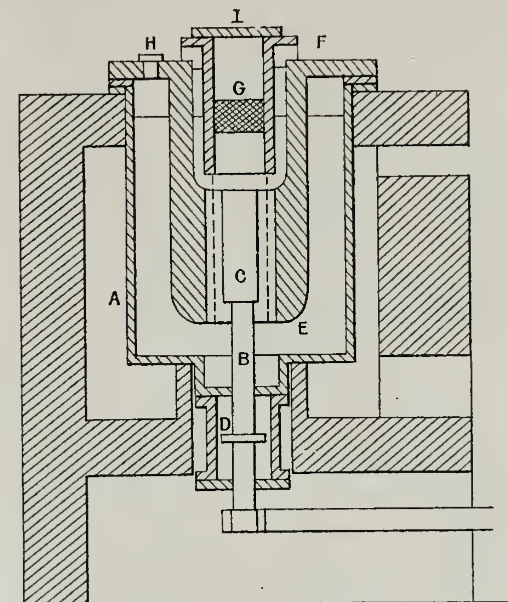


Fig. 142. — Appareil Castner pour la fabrication du sodium.

Alliages a base de sodium. — *Procédé Hulin.* — L'emploi d'une cathode en plomb dans l'électrolyse de chlorures alcalins, dans le but d'obtenir un alliage de plomb et du métal alcalin, avait été utilisé par Vautin, qui traitait ensuite cet alliage pour en extraire de la soude.

L'appareil se composait d'un cylindre en fer à fond hémisphérique rempli de plomb. Les côtés du cylindre étaient protégés par un revêtement en magnésie. L'anode, formée d'un charbon de cornue, imprégnée de sirop de sucre, séchée et calcinée, était fixée sur le couvercle, dont elle était isolée électriquement. Lorsque le plomb renfermait 20 0/0 de sodium, on le faisait couler par la partie inférieure de l'appareil et on traitait l'alliage par l'eau chaude ou la vapeur pour en retirer la soude.

Ce procédé présentait les inconvénients suivants : le sodium forme à la surface du plomb un alliage plus léger et finalement y reste en globules brillants, lesquels peuvent remonter dans le chlorure fondu et venir circuler à la surface du bain au contact du chlore; le métal grimpe dans la matière réfractaire isolante, la rend conductrice et la désagrège ; enfin le sodium, en se dissolvant dans le chlorure, donne un sous-chlorure non conducteur qui s'oppose de plus en plus au passage du courant. Ce procédé était donc très imparfait.

La disposition générale de l'appareil de Hulin rappelle celui de Vautin; mais il comporte en plus des récipients ouverts renfermant du plomb fondu, immergés dans le bain de chlorure de sodium. Ce plomb communique non pas avec le pôle négatif, mais avec le pôle positif; il agit comme anode soluble. Le bain renferme ainsi constamment du chlorure de plomb qui empêche

la formation de sous-chlorure de sodium. En outre, ce transport du plomb de l'anode à la cathode facilite le dépôt du sodium sur celle-ci et le métal s'allie mieux avec le plomb.

On établit donc une dérivation de façon à faire passer par l'anode soluble environ 12 0/0 de la quantité d'électricité totale. Cette perte est évidemment considérable; mais elle régularise la réaction et lui permet de se passer d'une façon normale en évitant l'élévation de la différence de potentiel aux bornes.

Dans ces conditions, l'alliage formé par l'électrolyse renferme environ 1 partie de plomb pour 2 de sodium.

Le métal de la cathode, formé primitivement de plomb, s'enrichit donc peu à peu en sodium; lorsqu'il en renferme environ 25 0/0, on le recueille; sa densité est de 3 à 3,3.

Par lessivage progressif, la soude que l'on obtient peut arriver à renfermer de 750 à 800 gr par litre d'alcali. La perte en plomb est de 1 0/0; celle en chlorure est de 4 0/0.

Chaque électrolyseur demande 7 volts et 2000 ampères, à raison de 7,5 amp : $cm^2$ d'anode.

Les essais industriels de ce procédé furent faits dans la papeterie Mathussière frères et Forest, à Modane, et réussirent très bien; mais l'usine montée à Clavaux par la société des Soudières électrolytiques ne put fonctionner. La principale cause de l'insuccès paraît avoir été l'attaque des anodes et l'impureté du chlore obtenu qui ne permettait pas d'avoir du chlorure de chaux au titre commercial.

C'est en effet l'écueil de tous les procédés basés sur l'électrolyse des chlorures par fusion ignée, les appareils étant rapidement détériorés par les chlorures liquides et par le chlore qui détruit tout à ces températures.

Le procédé est actuellement entre les mains de la Société d'Électrochimie, qui en essaie l'exploitation; il donne naissance à la préparation de produits accessoires intéressants. Outre l'avantage de marcher à très forte densité de courant, ce qui permet d'augmenter beaucoup la production relative par appareil, on peut, du premier jet, obtenir des lessives excessivement concentrées, ce qui est précieux pour les usines hydrauliques, où le charbon est en général difficile à se procurer et revient très cher en raison des frais de transport. On peut également obtenir du sodium (par distillation), de l'oxyde de sodium (par fusion avec la soude caustique), du bioxyde (par oxydation de l'oxyde), du cyanure (par chauffage avec le ferrocyanure), du plomb spongieux, du bioxyde de plomb (par calcination, il y a formation directement de soude et de bioxyde de plomb), etc. Le plomb et le bioxyde peuvent servir à la fabrication d'accumulateurs.

Parmi les produits exposés par la Société d'Électrochimie dans la classe 24, il faut citer du plomb-sodium, de l'étain-sodium, de la soude caustique cristallisée, du plomb spongieux, de l'étain spongieux.

## LITHIUM

La préparation du lithium paraît, au premier abord, une opération très facile; mais, lorsqu'on répète les opérations de Bunsen, Hiller et Troost, on s'aperçoit, en faisant des mesures quantitatives, que le rendement, très variable suivant les opérations, est en général très faible. En étudiant les meilleures conditions de préparation de ce métal, M. Guntz a remarqué que le rendement était d'autant plus élevé que la température était plus basse. Un sel impur contenant du chlorure de potassium donne, lorsqu'on l'électrolyse au voisinage de son point de fusion, de meilleurs résultats que le chlorure de lithium pur. L'addition de chlorure de potassium a en effet la propriété de baisser d'une façon considérable le point de fusion du chlorure de lithium; c'est ainsi que le chlorure de lithium fondant à 600° C. environ et celui de potassium à 740°, le mélange à molécules égales fond vers 380°, celui à 2 molécules de sel de potassium pour 1 de sel de lithium vers 550°, et celui à poids égaux vers 450°.

Le mélange le plus favorable à l'électrolyse est celui qui renferme poids égaux des deux sels; il peut être facilement fondu vers 450° et, pendant l'électrolyse, le mélange perdant du

chlorure de lithium, sa fusibilité devient plus grande, tandis que le mélange formé à molécules égales perdant du chlorure de lithium voit son point de fusion s'élever.

On obtient facilement de grandes quantités de lithium au moyen de l'appareil suivant qui figurait dans l'Exposition de l'Institut chimique de Nancy (classe 3, Enseignement supérieur, Institutions scientifiques). Une capsule en porcelaine à fond plat, de 10 cm de hauteur environ, A (*fig.* 143 et 144), entourée d'une toile d'amiante B, maintenue au moyen d'un fil métallique C (une casserole en porcelaine sans sa monture convient très bien, la rainure destinée au logement de la monture permettant de fixer solidement l'enveloppe en amiante). On met dans cette capsule 1 kg de chlorure de lithium et 1 kg de chlorure de potassium. L'anode est formée de trois charbons électrographitiques D réunis à un cercle de cuivre amenant le courant; la cathode, d'une tige de fer de 15 mm de diamètre, E, placée dans l'axe d'un tube en porcelaine de 5 cm de diamètre.

L'appareil disposé, on fond le mélange, puis on fait passer un courant de 60 à 80 ampères; dans ces conditions, la différence de potentiel aux bornes est de 10 à 12 volts. Une fois l'opération en train, il est inutile de chauffer, le liquide se maintient fondu sous la seule action du courant. On arrive à obtenir ainsi en deux heure environ 25 gr de lithium métallique; il y a lieu de remarquer, en effet, que le poids atomique du lithium est excessivement faible, de sorte que 26,8 ampères-heure ne donnent que 7 gr de lithium. Le rendement est donc de 60 à 75 0/0.

Pour retirer le métal obtenu, on opère de la façon suivante : Une fois le courant arrêté, on place sous le tube de porcelaine une cuiller en fer qui maintient le métal dans le tube pendant qu'on le sort du bain; au bout de quelques instants, le mélange de chlorures se solidifie dans la cuiller, on coule alors le lithium dans une lingotière et l'on obtient ainsi du premier coup le métal séparé de la gangue.

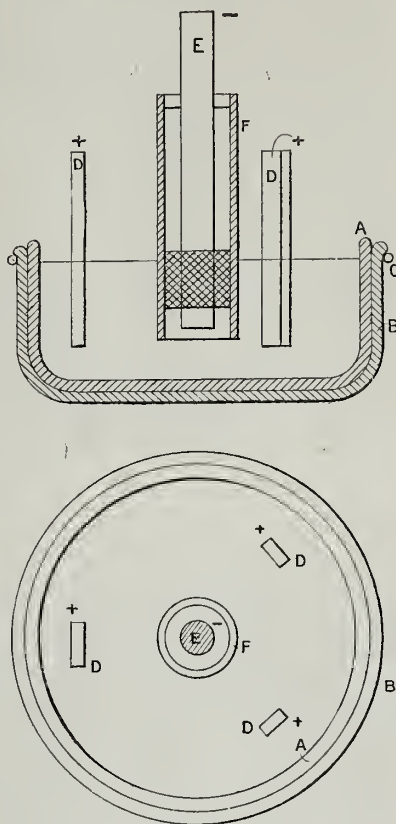


Fig. 143 et 144. — Appareil de M. Guntz pour la préparation du lithium.

M. Guntz explique les mauvais résultats obtenus à haute température par la formation d'un sous-chlorure de lithium, $Li^2Cl$, qui ne se produit qu'en quantité insignifiante lorsque l'on opère au-dessous de 500°. Ce sous-chlorure, diffusant dans le liquide fondu, arrive au pôle positif et agit sur le chlore pour régénérer le chlorure.

M. Guntz exposait dans l'annexe de la classe 24 un certain nombre d'échantillons de ce métal en lingots, barres, etc.

La maison Poulenc frères en exposait également dans l'annexe.

## MAGNÉSIUM

Le magnésium a été obtenu électrolytiquement par Bunsen en 1845 au moyen de chlorure de magnésium. L'appareil qu'il employait se composait d'un creuset en porcelaine séparé en deux parties par une cloison verticale ne descendant pas jusqu'au fond. Le couvercle du creuset était traversé par deux charbons. Celui qui servait de cathode était taillé en scie ; le magnésium, plus léger que l'électrolyte, venait alors se placer dans les dents de la scie et ne remontait pas à la surface.

La préparation électrolytique constitue actuellement le seul mode d'obtention de ce métal.

Le magnésium n'a, d'ailleurs, pas beaucoup d'importance et une seule fabrique le prépare, celle d'Hemelingen, près Brême.

Le minerai employé est la carnallite, chlorure double de potassium et de magnésium, répondant à la formule $KCl,MgCl^2,6H^2O$. Ce sel provient des mines de Stassfurth.

Ce sel doit être parfaitement desséché, soit à l'air libre, soit dans un courant de gaz chlorhydrique, puis fondu. La dessiccation a une grande influence, car, si la matière renferme des traces d'humidité au moment de la fusion, il y a dégagement d'acide chlorhydrique et formation de magnésie ou, tout au moins, d'oxychlorure de magnésium. Ces produits non conducteurs augmentent la résistance du bain et, par conséquent, la différence de potentiel aux bornes ; ils finissent même par s'opposer complètement au passage du courant.

L'appareil Graetzel, employé pour la fabrication du magnésium, se compose d'un creuset en fer servant de cathode ; il est obturé par un couvercle dans lequel passe le diaphragme en porcelaine, percé de trous à la partie inférieure et muni sur le côté d'un tube pour le dégagement du chlore. Ce diaphragme est fermé par un couvercle traversé par l'anode en charbon.

Pour éviter la combustion du magnésium, on fait circuler dans l'appareil un courant de gaz inerte.

Un certain nombre de bains sont montés en tension, ils doivent être chauffés directement, la quantité de chaleur dégagée par l'opération étant insuffisante pour maintenir le bain liquide.

Lorsque le magnésium a été recueilli, on le purifie par fusion avec de la carnallite.

La tension aux bornes est de 7 à 8 volts.

L'Exposition collective allemande de l'Industrie chimique renfermait un certain nombre de bocaux de ce produit sous différentes formes : lingots, barres, fils, lames, cubes, etc.

## GLUCINIUM

Des essais de préparation électrolytique du glucinium furent tentés par Nilson et Peterson, Borchers, Warren, etc..., qui obtinrent des résultats très imparfaits en raison de la non-conductivité des sels halogènes fondus du glucinium. M. Lebeau a résolu la question en électrolysant des fluorures doubles de glucinium et de sodium ou de potassium. Le fluorure de glucinium à l'état de pureté fond facilement en donnant un bain d'une grande transparence ; malheureusement, comme les autres sels halogènes, il n'est pas conducteur.

Les bains employés répondent aux formules : $GF^2,2MF$ et $GF^2,MF$ ; on peut même augmenter encore la teneur en glucinium, sans cesser d'avoir un produit très fusible et bon conducteur. La solubilité de ces produits croît d'ailleurs avec la teneur en glucinium, ce qui permet d'enlever facilement l'excès de fluorure ; les sels de potassium sont encore plus solubles que ceux de sodium.

L'électrolyse se fait facilement dans un creuset de nickel servant de pôle négatif ; l'anode est formée d'une lame ou baguette de charbon électrographitique qui n'est pas désagrégée sous l'action du courant. On fond le mélange préalablement, puis on fait passer le courant ; il devient dès lors inutile de chauffer ; il faut même que la température ne s'élève pas de trop et ne dépasse pas celle du rouge naissant. Le creuset n'est pas attaqué. On lave à l'eau aussi rapidement que possible pour enlever l'excès de fluorure et il reste un feutrage métallique non adhérent, entièrement constitué par des cristaux de glucinium pur ; ces cristaux, très brillants, sont à contour hexagonal ; ils sont quelquefois agglomérés les uns aux autres ou superposés en piles. On obtient des alliages de glucinium en remplaçant le creuset en nickel par un creuset en charbon au fond duquel on place le métal à allier. On porte à la température de fusion du métal et on ferme le circuit ; l'opération se conduit d'une façon régulière et on obtient ainsi des alliages très purs à teneur assez élevée.

M. Lebeau expose dans l'annexe de la classe 24 la série des produits lui ayant servi : émeraude de Limoges, glucine obtenu au four électrique (Voir fascicule *Electrothermie*,

pp. 58 et 61), fluorure de glucinium, fluorures doubles de glucinium et de sodium, métal en lingot, lames, fils, etc., alliages de glucinium.

### ALUMINIUM

Les premiers essais de préparation de l'aluminium avec le concours de l'électricité furent faits presque simultanément, en 1854, par Bunsen et Sainte-Claire Deville, qui obtinrent ce métal par électrolyse du chlorure double d'aluminium et de sodium. Deville, dans sa publication, recommanda l'emploi d'anodes solubles formées d'un mélange d'alumine et de charbon.

En raison du prix élevé de l'énergie électrique produite uniquement par les piles, on ne pouvait penser à cette époque qu'un procédé analogue deviendrait industriel. Les premiers résultats pratiques furent obtenus, en 1884, par les frères Cowles, qui fabriquèrent non pas l'aluminium, mais le bronze d'aluminium en chauffant, dans un four électrothermique á résistance, un mélange d'alumine, de charbon et de cuivre. En employant la bauxite, le charbon et le fer ou son oxyde, ils obtinrent le ferro-aluminium. En 1886, le Dr Kleiner électrolysait la cryolithe dans un creuset de graphite ; l'anode était en charbon ; la cathode, formée d'une plaque de cuivre refroidie ; ces essais furent repris par Killiani, en 1888. En 1886, M. Héroult prit un premier brevet pour la préparation de l'aluminium par électrolyse de l'alumine en dissolution dans la cryolithe fondue, puis un second, en avril 1887, pour compléter le premier, notamment sur l'utilisation de l'action thermique du courant.

Peu après, M. Minet obtint quelques résultats à Paris (1887), à Creil (1888), à Calypso (Saint-Michel-de-Maurienne, 1891), dans l'usine de MM. Bernard frères; M. Minet employait comme électrolyte un mélange de chlorure de sodium (70 parties) et de cryolithe (30 parties). L'opération se faisait dans une cuve en fer dans laquelle plongeaient deux électrodes. Pour préserver la cuve de l'action corrosive du bain, elle était mise en relation avec le pôle négatif et une résistance permettait de faire passer la centième partie du courant; la cuve se trouvait ainsi constamment couverte d'une mince couche d'aluminium qui devait la préserver de l'attaque. Le procédé Minet ne réussit pas, malgré les modifications de MM. Bernard, qui arrivèrent à un procédé assez analogue à celui d'Héroult. L'usine cessa de fonctionner. Elle fut achetée, il y a peu de temps, par la Compagnie des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue (ancienne maison Péchiney et Cie), qui a installé le procédé Hall.

Le procédé Hall parut quelque temps après le procédé Héroult; il consiste, comme celui-ci, à électrolyser une solution d'alumine dans la cryolithe en fusion, en ajoutant au bain du fluorure de calcium pour en augmenter la fusibilité. En somme, il ne diffère pas du procédé Héroult, d'après l'inventeur de ce dernier procédé; le procès en contrefaçon ne fut pas intenté pour éviter la divulgation des perfectionnements et des tours de main.

Enfin on a parlé, il y a quelque temps, du procédé Péniakoff, basé sur l'électrolyse du sulfure d'aluminium et qui présenterait l'avantage de demander, á densité de courant égale, de 3 à 5 volts au lieu de 7 à 8. Mais les essais ne paraissent pas avoir réussi. La « Société métallurgique de l'Aluminium », qui exploite ces procédés en Belgique, exposait dans la Section des Produits chimiques une collection complète de produits alumineux, donnait des notices sur l'emploi de ces différents produits, mais restait muette sur l'aluminium métallique.

Les Expositions rétrospectives de la Chimie et de l'Électrochimie renfermaient des objets remarquables. Tandis que la seconde avait un groupe fondu par la maison Christophle avec le premier aluminium commercial, la première contenait le premier lingot préparé, en 1855, á l'usine de Javel et forgé par Sainte-Claire Deville et le premier lingot en bronze d'aluminium obtenu par Debray en 1857, le premier et le dernier lingot d'aluminium coulés aux usines de Salindres (Péchiney et Cie), en 1859 et 1889, et obtenus par le procédé Deville dont la production, en 1889, était de 3 tonnes.

On remarquait également les engrenages en bronze d'aluminium employés á Salindres pour les cylindres à sodium. M. Minet avait fait figurer une tige d'aluminium forgée à chaud

et retirée d'une barre de 9 cm² de section, dont le métal avait été obtenu, en 1887, par son procédé, alors en essai à Paris (impasse du Moulin-Joli), dans une cuve chauffée extérieurement. Il exposait également un des premiers culots obtenus à l'usine de Calypso, en 1892.

Théorie de la fabrication. — Diverses théories ont été admises ; nous ne pouvons mieux faire que de reproduire celle donnée par M. Héroult, au Congrès des mines et de la métallurgie :

« Plusieurs auteurs ont prétendu que l'alumine n'était pas électrolysée ; ceci est en contradiction avec l'énoncé de mon brevet, dans lequel je parlais effectivement de l'électrolyse de l'alumine. Or j'ai prouvé que l'alumine était électrolysable en fondant par l'arc et en décomposant l'alumine par le courant.

« J'obtenais des quantités faibles, il est vrai, de métal, mais néanmoins indéniables (ces quantités étaient de plusieurs centaines de grammes). De là à dire que, dans le procédé actuellement suivi, c'est une pure et simple électrolyse de l'alumine qui a lieu, il y a un pas. En effet, si nous faisons l'électrolyse de la cryolithe seule, nous obtenons de l'aluminium ; mais il n'apparaît pas de fluor. Le fluor s'est donc fixé pour former, avec le fluorure de sodium en excès (en excès par suite de la disparition de fluorure d'aluminium), un composé fixe à la température considérée. Ce composé peut être mis en évidence en broyant la masse refroidie et en la faisant digérer dans l'eau. On obtient alors une partie insoluble ayant tous les caractères et la composition de la cryolithe et une partie soluble qui n'est autre que le fluorure acide de sodium. D'autre part, si l'expérience a lieu à une température élevée, on n'obtient pas d'aluminium. On constate, en revanche, un dégagement de vapeurs de sodium.

« La conclusion à tirer de ces expériences, au point de vue de l'explication cherchée, est donc que l'électrolyse a pour effet de précipiter, sur la cathode, du sodium qui, s'il est à l'état liquide, réduit le fluorure d'aluminium. Dans ce cas, il n'apparaît que ce dernier métal. Si la température est plus haute, le sodium apparaît en vapeur et la réduction du fluorure d'aluminium n'a pas lieu, faute de temps et de circonstances favorables. Dans ce cas, il y a probablement dédoublement de la cryolithe, puisque, bien que le fluorure de sodium ne soit pas en excès, le fluor est quand même fixé par l'électrolyte. Ceci posé, le rôle de l'alumine est facile à expliquer. En effet, d'une part, nous avions un composé liquide contenant du fluor en excès ; d'autre part, de l'alumine et du charbon ; il est évident que, si les chaleurs de formation de l'alumine et du fluorure sont comparables, nous aurons, en faveur de la conversion de l'alumine en fluorure, ce fait que l'oxygène de l'alumine pourra brûler au contact de l'anode. »

« En réalité, c'est bien ce qui se passe et la réaction en question, bien que secondaire, n'a lieu qu'au contact du positif en charbon.

« Une autre constatation vient à l'appui de la théorie ci-dessus, c'est que le bain, bien que composé d'éléments théoriquement saturés et incapables de réaction sur l'aluminium, en a une démontrée, par ce fait qu'il y a une force contre-électromotrice et que le rendement en ampères n'est pas théorique. »

Préparation des matières premières. — Le procédé universellement employé aujourd'hui pour la fabrication de l'aluminium est donc le procédé Héroult, dont la matière première est l'alumine. Un point important de cette fabrication est l'obtention des matières pures. En effet, de faibles quantités de silice donnent du silicium qui passe dans le métal cherché, dont il constitue la principale impureté. On évitera cette silice le plus possible en utilisant non pas, comme minerai, la bauxite blanche d'apparence plus pure, quoique renfermant beaucoup de silice, mais la bauxite rouge, dont le fer est plus facile à éliminer. Cette dernière variété renferme de 1 à 3 0/0 de silice, 65 d'alumine, le reste étant constitué par de l'oxyde de fer. Dans les usines américaines, on emploie la gibbsite $Al^2O^3,2H^2O$. On utilise, en France notamment, deux procédés pour l'extraction de l'alumine de la bauxite. Dans le procédé Péchiney, on fond au four à réverbère la bauxite avec du carbonate de soude et du charbon ; puis on lessive, en ne poussant pas le lavage à fond ; on enlève simplement l'aluminate de sodium en laissant la silice. On chauffe sous pression ; la silice entraînée est précipitée à l'état de silico-aluminate insoluble ; on

filtre et on précipite l'alumine par l'anhydride carbonique. On calcine le produit obtenu pour lui enlever ses propriétés hygroscopiques. Il renferme alors de 2 à 3 0/00 de silice. Dans le procédé Bayer, l'aluminate obtenu est mélangé avec de l'alumine d'une opération précédente et maintenu en agitation constante ; il se produit un entraînement et il se dépose de l'alumine cristalline, tandis qu'il reste en solution un aluminate très basique $Al^2O^3,6Na^2O$, qui peut être concentré à 45° Baumé dans un appareil à effet multiple et servir au lieu d'alcali pour l'attaque suivante.

Électrolyseurs. — L'appareil Héroult se compose d'une cuve en tôle d'acier solidement rivée (marmite), dont l'intérieur est brasqué au moyen d'un mélange de coke ou graphite et de goudron. Cette brasque est tassée sur une épaisseur de 15 à 20 cm ; pour faire les parois, l'ouvrier peut soit élever la pâte peu à peu le long des côtés, soit placer au centre de la cuve des pièces de bois ayant les dimensions de la partie interne du four. Il est facile alors de tasser la brasque autour. On ménage à hauteur du fond une ouverture pour la coulée du métal.

Lorsque tout est fini, on retire les pièces de bois que l'on remplace par des briques ou du poussier de charbon et la cuve est portée dans un four à électrodes. On élève peu à peu la température que l'on porte au rouge blanc et on laisse refroidir lentement. L'opération dure quarante-huit heures.

Les anodes sont fabriquées comme nous l'avons vu précédemment. Il faut apporter un soin tout spécial au choix des matières premières ; l'anode, en effet, comme nous le verrons, participe à la réaction, son usure est considérable et les impuretés qu'elle renferme, fer, silice, etc., se retrouvent dans l'aluminium. On emploie exclusivement le coke ou le charbon de bois et le goudron. En Amérique, on utilise le coke de pétrole. En général, la tête de l'anode est dressée et serrée entre des pinces ou simplement à l'aide de plaques de fer. Elle est supportée par une potence, et un dispositif spécial permet de l'élever ou de l'abaisser à volonté. Dans les bains de grandes dimensions, il y a un certain nombre d'anodes montées en quantité.

Les bains sont montés en tension, au nombre d'une vingtaine ; ils demandent de 6 à 7 volts.

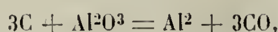
Marche de l'opération. — On place dans la cuve une certaine quantité du mélange d'alumine et de cryolithe et on détermine un court-circuit ; la cryolithe fond, on écarte peu à peu l'anode et on charge au fur et à mesure avec le mélange. Lorsque le bain a atteint la hauteur voulue, il suffit alors d'alimenter en alumine.

Pour empêcher le refroidissement, au contact de l'air, de la surface du bain et pour éviter la combustion de l'anode au niveau du liquide, on recouvre le tout de charbon en poudre provenant de résidus d'électrodes. Ce charbon se trouve porté au rouge sombre. L'alumine à ajouter, additionnée d'une certaine quantité de cryolithe pour compenser les pertes, doit être soigneusement dosée et ajoutée au bain d'une manière uniforme. Sa solubilité est, en effet, très faible, 5 0/0 environ et, dès que la proportion diminue, la résistance du bain augmente considérablement. Celui-ci risque alors de chauffer davantage, ce qui amène des perturbations dans l'électrolyse ; il se dégage du sodium, il se forme du bioxyde de sodium et l'opération s'active. Il est alors impossible de s'en rendre maître et il faut de toute nécessité arrêter la cuve en la mettant hors circuit. Cela occasionne des frais considérables, étant donnée la difficulté de la mise en marche.

Pour suivre l'opération, on place un voltmètre aux bornes du bain ; mais il est beaucoup plus simple d'utiliser une lampe à incandescence à faible voltage, de 9 à 10 volts. Cette lampe est mise en dérivation avec le bain. En marche normale, le filament est à peine rouge, la tension n'étant que de 6 à 7 volts. Mais lorsque, par suite de la diminution de l'alumine, la résistance augmente et, par suite, la tension aux bornes, la lampe se met à briller de plus en plus. Comme il y a tout intérêt à ajouter au bain de l'alumine déjà chauffée, l'ouvrier, qui a à côté de lui sa provision pour la journée, en met une certaine quantité à la surface du bain ; grâce à la couche de charbon, l'alumine s'échauffe peu à peu, mais sans être en contact avec le liquide. Lorsque le moment est venu d'en ajouter, l'ouvrier brasse la masse avec un ringard, l'alumine se dissout et

le charbon non mouillé remonte à la surface ; on le recouvre alors d'une nouvelle couche d'alumine. Un four bien conduit fonctionne sans arrêt de trois mois à un an.

L'ouvrier doit également surveiller l'usure des anodes. Lorsque l'opération est régulièrement conduite, le charbon ne s'use que dans le bain si sa surface est bien couverte. Cette usure a lieu par suite de l'action de l'oxygène. Elle est donc proportionnelle à la quantité d'aluminium fabriquée, d'après la réaction :



$$3C + Al^2O^3 = Al^2 + 3CO,$$

c'est-à-dire que, pour une tonne d'aluminium, il faut compter 700 kg d'anode (théoriquement 667 kg) ; en pratique, la consommation est beaucoup plus grande. Il faut enfoncer l'anode dans le bain au fur et à mesure de son usure ; elle se comporte, somme toute, comme anode soluble.

Quant à la cathode, elle est formée par l'aluminium lui-même, fondu au bas de la cuve.

Suivant l'importance des bains, l'ouvrier peut en conduire 4, 5 ou 6.

La coulée du métal a lieu toutes les vingt-quatre heures pour les fours de petites dimensions, toutes les douze heures et même toutes les deux heures pour les fours grand modèle.

Le trou de coulée ménagé, comme nous l'avons vu, à la base du four est fermé par un tampon de fer entouré de pâte à anode non cuite. Assez souvent l'entrée en est obturée par de l'électrolyte solidifié ; il faut alors percer cette croûte à coups de marteau au moyen d'une longue tige de fer.

Le métal coule ; il est reçu dans une poche en fer. Il est très brillant. Lorsque tout le métal est recueilli, l'électrolyte apparaît transparent et plus rougeâtre.

L'ouvrier ferme alors le trou de coulée au moyen d'une boule de pâte à anode, qu'il enfonce au moyen d'un tampon de fer. Le métal recueilli est coulé dans des lingotières.

Le métal obtenu est très pur ; il renferme seulement des traces de fer et de silicium.

Au sujet des alliages, nous ferons remarquer que l'on n'en obtient aucun directement ; il y a intérêt à préparer l'aluminium pur que l'on fond ensuite en quantité convenable avec les autres métaux également purs.

Produits exposés. — L'aluminium est actuellement produit par le procédé Héroult dans les usines suivantes, dont quelques-unes utilisent les modifications de Hall.

France : La Praz : Société électrométallurgique française ; — Calypso : Compagnie des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue ;

Suisse : Newhausen : Aluminium Industrie Aktien Gesellschaft ;

Allemagne : Rheinfelden : Aluminium Industrie Aktien Gesellschaft ;

Autriche : Lend-Gastein : Aluminium Industrie Aktien Gesellschaft ;

Angleterre : Foyers : British Aluminium C°;

États-Unis : Niagara-Falls : Pittsburg Reduction C°.

La production de 1899 a été, d'après M. Héroult, pour 50 000 chevaux, de 5 millions de kg représentant 16 millions de francs et laissant 5 millions de bénéfices, pour un capital de 38 millions.

Les différentes Sociétés productrices de l'aluminium avaient exposé.

La Compagnie des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue (anciennement Péchiney et C^ie^) exposait, dans l'annexe, des lingots et matières premières et avait fait construire, en outre, au centre de la classe 24, un pavillon en bois et aluminium avec la collaboration de maisons utilisant ses produits. La vitrine renfermait notamment un buste d'Henri Sainte-Claire Deville et un médaillon de Wöhler en aluminium.

La Société électrométallurgique française exposait, dans la classe de la Petite Métallurgie, les produits de sa fabrication et un certain nombre d'objets provenant de fabriques utilisant ses produits.

La British Aluminium C° avait une exposition extrêmement importante de matières premières, lingots, produits bruts ou ouvrés.

La Pittsburg Reduction C° exposait dans le groupe des Mines et de la Métallurgie, section des États-Unis ; malheureusement cette exposition était sans intérêt et peu en rapport avec l'importance de la Société ; elle est d'ailleurs passée totalement inaperçue ; les échantillons de bauxite, aluminium en fils et feuilles étaient tout à fait insignifiants.

La Collectivité allemande de l'Industrie chimique renfermait un certain nombre d'échantillons d'aluminium ; comme produits travaillés, il faut citer l'exposition de la maison Heraeus, de Hanau, qui a résolu le problème de la soudure autogène de l'aluminium.

Voici comment il convient d'opérer :

On prend une bande de tôle d'aluminium, d'environ 1 mm d'épaisseur, dont on lime au préalable les surfaces à souder et on en forme un tuyau d'environ 35 mm de diamètre et de 300 mm de longueur, le recouvrement étant d'environ 10 mm. Le bout de tuyau ainsi formé est mis sur un mandrin préalablement chauffé, puis un ouvrier le chauffe avec précaution jusqu'à une température encore au-dessous du rouge, mais l'atteignant presque. Le maître-soudeur suit l'opération en frappant continuellement de légers coups de marteau sur le métal pour établir le moment où la température voulue est atteinte ; à ce moment, il ferme rapidement le joint en le martelant légèrement. Le soudage se fait progressivement le long du joint, mais sans employer de poudre ni de liquide quelconque. La chaleur est donnée par la flamme du chalumeau d'une soufflerie à gaz.

Aucune trace d'oxydation ne peut être relevée à la surface de l'aluminium et le joint est devenu tout à fait invisible.

La grande difficulté de l'opération vient de ce que, si l'on dépasse tant soit peu la température voulue, le métal devient excessivement cassant. Il faut donc avoir une très grande habitude.

La maison Heraeus exposait un tube croisé à six tubulures, un grand récipient de 1 200 litres avec couvercle, auquel étaient soudées trois tubulures, des entonnoirs, etc., un conducteur en aluminium formé de dix pièces raccordées, des pièces de toutes sortes, etc.

Les objets fabriqués en aluminium occupaient une place importante : signalons rapidement des conducteurs électriques de toutes dimensions et notamment ceux en service dans l'Annexe de l'Électrochimie, calculés pour une intensité de 600 ampères ; des bâtis de moteurs et de dynamos, des pièces d'appareillage électrique, un pont de 18 m, des affûts de canon de montagne, des pièces de campement militaire, tambours, bidons, marmites, gobelets, boutons, plaques de ceinturon, etc. ; des objets de petite mécanique, des pièces de carrosserie, caisses de voitures, caisses d'automobiles, cornières, panneaux, volants de direction, carburateurs, graisseurs, etc. ; bateaux démontables, objets de cuisine de toutes sortes, vaisselle, objets d'ameublement et d'ornementation, etc...

La plupart de cet aluminium est employé sous forme d'alliage tenant 3 à 6 0/0 de cuivre.

De nombreuses maisons se sont fait une spécialité d'alliages : alliage Cothias, magnalium, albradium, partinium, etc.

Aluminothermie. — Un certain nombre d'essais scientifiques avaient été faits au sujet de l'emploi de l'aluminium comme réducteur; mais les opérations étaient très difficiles à régulariser ou bien elles étaient dangereuses. M. H. Goldschmidt est parvenu à rendre cette réaction tout à fait régulière en produisant des mélanges d'aluminium avec l'oxyde du métal que l'on désirait obtenir et en enflammant ce mélange au moyen d'une cartouche de bioxyde de baryum et aluminium, par l'intermédiaire d'un fil de magnésium ou d'une allumette-tison. L'aluminothermie peut être divisée en deux genres d'opérations tout à fait différentes :

1° *Préparation des métaux réfractaires.* — Nous avons vu, dans le fascicule *Électrothermie* (p. 57 et 58), que, grâce au four électrique, on pouvait fabriquer un assez grand nombre de métaux assez difficiles à obtenir jusqu'alors : chrome, manganèse, ferro-silicium riche, etc., en chauffant un mélange d'oxyde et de charbon. On préparait, en général, une fonte que l'on

affinait en la chauffant à nouveau avec une certaine quantité d'oxyde. Mais cette dernière opération augmentait le prix de revient et rendait le procédé peu pratique ; d'ailleurs il était à peu près impossible industriellement d'obtenir le métal complètement exempt de carbone.

Dans le procédé Goldschmidt, on mélange les quantités moléculaires de l'oxyde dont on veut avoir le métal et d'aluminium préparé à cet effet et ayant une texture spéciale; il ne doit être ni porphyrisé, ni en morceaux trop gros. Le mélange est introduit dans un creuset garni à l'intérieur d'un enduit réfractaire et armé à l'extérieur d'une sorte de grillage pour éviter la rupture du creuset ; on introduit une cartouche formée du mélange précité et on allume le morceau de magnésium ; le feu se communique à la cartouche, puis au mélange et gagne de proche en proche toute la masse ; bien que l'action soit excessivement énergique et la température extrêmement élevée, l'opération est très calme et il n'y a pas de projection en dehors du creuset si les matières premières sont bien sèches. Le métal pur s'accumule dans le fond du creuset; au-dessus se trouve l'alumine, résultant de la combinaison de l'aluminium avec l'oxygène. La température résultant de la combinaison est tellement élevée que cette alumine fondue donne un corps présentant toutes les propriétés du corindon et notamment la dureté. Ce corindon renferme le petit excès d'oxyde employé et toutes les impuretés, telles que chaux et silice.

Les oxydes sont tous réduits par ce procédé, mais plus ou moins facilement ; la réunion du métal est quelquefois assez difficile pour les métaux très réfractaires ; c'est ainsi que le chrome ne se fait bien que si l'on opère au moins sur plusieurs kilogrammes de mélange. Le corindon qui en résulte, coloré en rouge par l'oxyde, n'est autre chose que du rubis artificiel, que l'on peut employer concurremment à l'émeri et pour les mêmes usages.

2° *Aluminothermie proprement dite.* — La température dégagée sous l'action de l'aluminium sur un oxyde métallique est tellement élevée que l'on peut, comme nous venons de le voir, obtenir la fusion de l'alumine, un des corps les plus réfractaires que l'on connaisse ; aussi a-t-on pensé utiliser cette action comme moyen de chauffage local pour souder les métaux et particulièrement le fer.

Cette application peut s'adresser à la soudure proprement dite ou jonction intime de deux pièces du même métal, deux rails ou deux tuyaux, par exemple, ou à la réparation de pièces métalliques usées ou endommagées par accident. C'est ainsi qu'il est possible de remettre à neuf sur place des rails usés, des dents de pignon, des plaques de blindage, etc...

Dans le premier cas, la thermite (mélange d'oxyde de fer et d'aluminium) sert uniquement comme agent de chauffage.

Dans le second cas, elle sert à préparer le métal que l'on veut couler et amener ce métal à la fusion nécessaire.

Nous allons, à titre d'exemple, donner la description des opérations à effectuer pour la soudure de deux tubes de fer ; la soudure des rails est analogue; quant à la réparation des pièces usées ou abîmées, elle est excessivement simple, la seule partie délicate étant le choix d'un oxyde ou d'un mélange, d'oxyde capable de donner naissance à un métal aussi semblable que possible, comme constitution moléculaire, à celui du métal de la pièce à réparer.

Considérons deux tubes de fer : on commence d'abord par bien nettoyer les parties à réunir, à la lime par exemple ; on joint les deux tubes en les maintenant dans des pinces réunies par des tirants à vis, qui permettent non seulement d'unir intimement les deux branches à souder, mais encore de forcer le serrage lorsque l'on arrive au point voulu.

La partie à souder est entourée d'un moule en tôle très simple, qui épouse la forme du tube en laissant le jeu nécessaire pour recevoir la coulée du mélange de chauffe.

Pour opérer la soudure, on met dans le creuset une petite quantité de thermite ; on provoque la réaction au moyen d'une cartouche d'allumage ou d'une poudre dont la composition peut varier (c'est en général un mélange d'aluminium et d'un peroxyde très instable) ; l'on ajoute alors progressivement la quantité convenable de thermite. Au bout de quelques secondes, la fusion est complète et l'on verse le contenu du creuset dans le moule.

Le corindon qui est au-dessus coule le premier ; comme sa température de fusion est très

haute et certainement supérieure à 2500°, les parois du moule et le tube formant parois froides se recouvrent instantanément d'une couche de 2 ou 3 mm de corindon ; c'est grâce à cette courbe préservatrice que l'on peut, sans provoquer une fusion générale, opérer la coulée. Le fer ou le métal de la thermite se sépare et s'amasse en lingot à la partie inférieure.

Au bout de quelques instants, la température du tube est maximum ; on force alors sur les vis de serrage, et les deux parties du tube s'unissent intimement.

Au bout de quelques minutes, on enlève le moule et on fait tomber la gangue ; la soudure est faite.

Cette opération est excessivement simple et réussit toujours très bien, surtout lorsque l'opérateur a quelque pratique ; on doit simplement observer un certain nombre de règles qui s'apprennent en peu de leçons et permettent d'exécuter une soudure si parfaite qu'il est difficile de la distinguer.

La principale habileté d'exécution consiste dans la rapidité et aussi dans le soin d'éviter le contact du fer à souder avec le fer en fusion.

MM. Karl et Hans Goldschmidt ont fondé à Essen-s/-Ruhr, à côté de leur importante fabrique des produits chimiques, une Société pour l'exploitation de l'aluminothermie (Chemische Thermo-industrie), qui exposait dans la Collectivité allemande de l'Industrie chimique et au Palais des Mines et de la Métallurgie la collection complète de ses produits et appareils.

La Société d'Électrochimie, qui a la licence, pour la France, des brevets Goldschmidt, exposait également à la classe 24 et à l'Annexe ; en outre des expériences publiques étaient faites chaque semaine par les soins de cette société.

Parmi les produits exposés dans ces différentes classes, nous signalerons d'énormes blocs de chrome, manganèse, rubis, des échantillons de ferro-bore, ferro-titane, cuivre-manganèse, nickel, cobalt, etc. et de l'oxyde de vanadium. Il est à remarquer, en effet, que seul l'oxyde de vanadium n'a pu être réduit complètement et est amené simplement à l'état d'oxydule.

Une des vitrines du Palais des Mines et de la Métallurgie était consacrée à la soudure des tubes et renfermait une série de pièces préparées montrant les phases successives de l'opération.

Une autre vitrine, enfin, renfermait des pièces soudées, des rails et des engrenages réparés, etc. Enfin, dans la Collectivité allemande de l'Industrie chimique, se trouvait une série de mélanges, notamment de la thermite, de la poudre d'inflammation, etc.

---

## III

# L'OZONE

Appareils de laboratoire. — M. Berthelot faisait figurer dans l'Exposition centennale des Produits chimiques des tubes à effluves. Son appareil employé pour la production de l'ozone est classique. Il se compose, comme chacun sait, de deux tubes concentriques entre lesquels on fait circuler l'oxygène. L'ensemble plonge dans de l'acide sulfurique, le tube central est rempli du même liquide. Dans chaque compartiment à acide, plonge une lame de platine ; les électrodes sont reliées avec les deux pôles du secondaire d'une bobine de Rhumkorff.

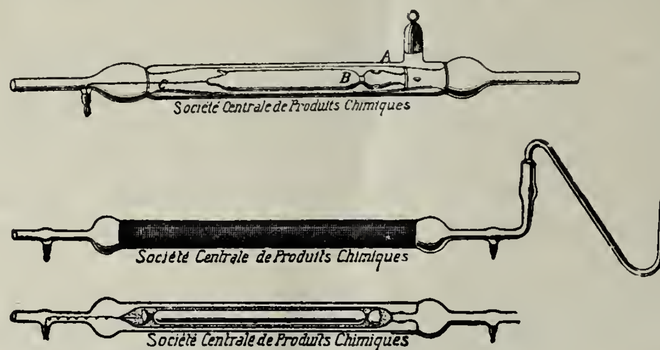



Fig. 145, 146 et 147. — Appareils à ozone de M. Châtelain.

M. Châtelain exposait, dans la vitrine de la Société centrale de Produits chimiques (classe 87), deux modèles d'appareil à ozone de laboratoire. Ce sont des modifications de l'appareil de M. Berthelot, dans lequel on remplace l'acide sulfurique par de la limaille métallique (modèle 1898) (*fig.* 145 et 146) ou par des espaces dans lesquels on a fait le vide (modèle 1899) (*fig.* 147). Ce dernier se compose donc de trois pièces concentriques en verre ; on fait le vide dans le compartiment interne et le compartiment externe et les gaz circulent dans le compartiment moyen.

La Société industrielle de l'Ozone exposait dans l'annexe de la classe 24 un appareil basé sur les recherches de MM. Marmier et Abraham et destiné spécialement à la production de l'ozone en vue de la stérilisation des eaux.

Appareils industriels. — Les premiers essais de ces auteurs remontent à l'année 1895 ; ils leur permirent d'établir que les conditions de la stérilisation de l'eau par l'ozone sont les suivantes :

*A*. Concentration minimum de l'air ozoné ; cette concentration devra nécessairement dépendre de la nature des eaux en traitement sans cependant descendre au-dessous de 4 à 5 milligrammes par litre d'air ;

*B*. Nécessité de maintenir le contact entre l'eau et l'air ozoné pendant un temps plus ou moins long ;

C. Nécessité d'un contact moléculaire.

D'après ces conditions, on voit qu'il est de toute nécessité de pouvoir régler :

1° La vitesse de l'eau dans les cuves de stérilisation ;

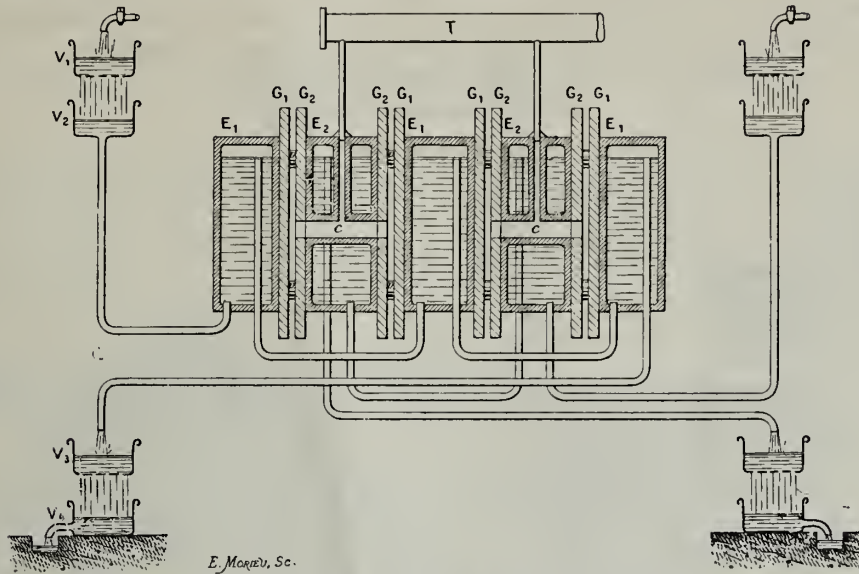



Fig. 148. — Coupe d'un appareil à cinq plateaux de MM. Marmier et Abraham pour la production de l'ozone.

2° La vitesse de l'air ozoné ;

3° Le degré de concentration de l'ozone.

Les principes sur lesquels est basé l'appareil de MM. Marmier et Abraham sont les suivants :

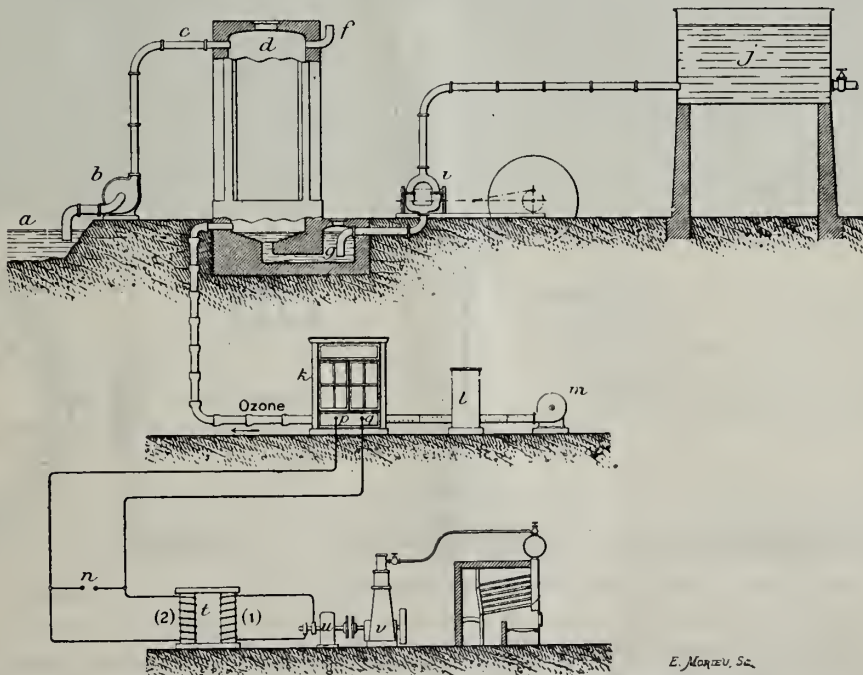



Fig. 149. — Schéma d'une usine de stérilisation des eaux par l'ozone.

Circulation de l'air entre deux plateaux métalliques présentant une assez grande différence de potentiel et production d'une décharge électrique sous forme d'effluves ;

Emploi de lames de verre comme diélectrique destiné à empêcher la mise en court-circuit des plateaux, par suite de la formation d'un arc électrique;

Régularisation du potentiel au moyen d'un déflagrateur formé de deux boules métalliques

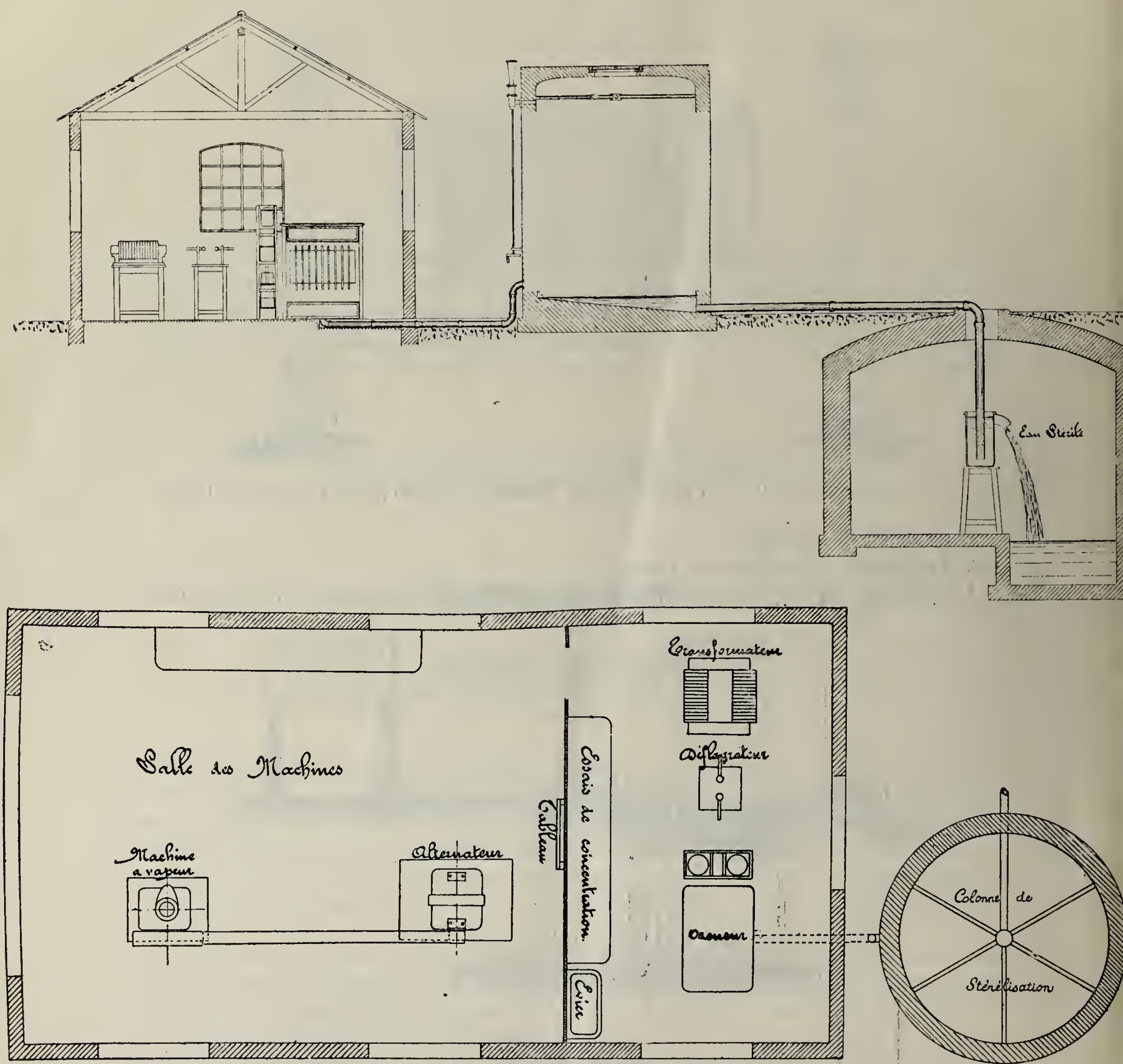



FIG. 150 et 151. — Coupe et plan de l'usine de stérilisation des eaux par l'ozone à Emmerin.

placées en dérivation sur les plateaux; lorsque la tension est trop élevée, l'arc jaillit entre les boules; de la sorte il n'y a jamais rupture des glaces;

Emploi d'électrodes à refroidissement interne, de façon à permettre de marcher avec une forte densité de courant.

La figure 148 montre le schéma d'un appareil à cinq plateaux.

Les plateaux $E_1$ sont reliés à l'une des bornes du transformateur, les plateaux $E_2$ à l'autre. Les glaces $G_1$ correspondent aux plateaux $E_1$, les glaces $G_2$ aux plateaux $E_2$. Les plaques $G_2$ sont percées au centre pour permettre l'arrivée de l'air fourni par une nourrice T, lequel traverse les plateaux $E_2$.

Le point intéressant est le dispositif permettant de refroidir les deux séries d'électrodes avec l'eau prise à la même canalisation. Ce dispositif consiste à faire arriver l'eau dans un vase $V_1$, d'où elle s'écoule par le fond perforé, sous forme de pluie fine, dans le vase $V_2$ isolé électri-



Fig. 152. — Vue de l'usine de stérilisation des eaux par l'ozone à Emmerin.

quement; elle se rend ensuite dans une série d'électrodes, par une canalisation parfaitement isolée. Après sa sortie, elle se rend dans un nouveau vase $V_3$ également isolé et s'écoule sous forme de pluie dans un vase $V_4$.

L'eau devant servir à la réfrigération de l'autre série d'électrodes est traitée de la même façon.

L'isolement des liquides est parfait pour des différences de potentiel de 30 à 40 000 volts, lorsque la hauteur de pluie atteint 40 à 50 cm.

En principe, une installation pour la stérilisation des eaux est établie de la façon suivante (*fig.* 149) :

Le liquide est aspiré en *a* par une pompe centrifuge *b*; il est remonté au sommet *c* de la colonne *d*, dont la disposition intérieure a pour but de diviser l'eau en minces filets sur lesquels s'exerce l'action de l'ozone; un puisard *g* recueille l'eau qui, reprise par une pompe élévatoire *i*, est refoulée au réservoir de distribution *j*.

L'air ozoné est amené à la partie inférieure de la chambre de stérilisation, qu'il traverse de bas en haut, pour sortir en *f*.

La circulation de l'ozone est assurée par un ventilateur *m* aspirant l'air atmosphérique pour le faire passer d'abord dans un dessiccateur *l*, dans un ozoneur *k*, enfin dans la colonne *d*.

Le dessiccateur n'est autre chose qu'un cylindre contenant de l'acide sulfurique concentré, qui absorbe la vapeur d'eau contenue dans l'air.

L'ozoneur que nous avons décrit précédemment a ses électrodes en fonte. Le courant électrique nécessaire à la production des effluves est fourni par un transformateur *t*, dont le circuit primaire (1) reçoit le courant d'un alternateur *u* actionné par la machine à vapeur *v*.

Le circuit secondaire (2) fournit à l'ozoneur des courants à une tension voisine de 40000 volts.

En *n*, on place en dérivation sur le circuit à haute tension le déflagrateur. L'étincelle produite est soufflée continuellement au moyen d'un jet d'air comprimé ou de vapeur.

L'installation de MM. Marmier et Abraham comprenait simplement la fabrication de l'ozone. En outre, un grand nombre de dessins et photographies reproduisaient des détails soit de l'usine d'Emmerin, soit de l'usine du Boléo (Mexique).

C'est à Emmerin, dans l'usine élévatoire des eaux de la ville de Lille, que MM. Abraham et Marmier ont établi une installation capable de stériliser 3 000 m$^3$ d'eau par vingt-quatre heures. Nous donnons (*fig.* 150, 151 et 152) un plan, une coupe et une vue de cette usine.

Enfin, dans l'Exposition rétrospective des produits chimiques, se trouvaient divers appareils de M. Otto.

---

# TABLE DES MATIÈRES

### Généralités



I

### Électrochimie

A. — Electrolyse des solutions en vue de préparer des métalloïdes



B. — Electrolyse des chlorures alcalins

C. — Electrolyse des solutions en vue de préparer des acides, bases, sels, etc.



II

## Électrométallurgie

A. — Electrolyse par voie humide

B. — Électrolyse par fusion ignée



III

L'ozone



---

# L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

E. HOSPITALIER
Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

J.-A. MONTPELLIER
Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION

*D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS*

---

13[e] FASCICULE

## INSTRUMENTS DE MESURE ÉLECTRIQUE

PAR

J.-A. MONTPELLIER et M. ALIAMET

---

PARIS

V[ve] CH. DUNOD, ÉDITEUR

49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49

TÉLÉPHONE 147-92

1901

# L'ÉLECTRICITÉ

A

# L'EXPOSITION DE 1900

## TREIZIÈME PARTIE

## INSTRUMENTS DE MESURE ÉLECTRIQUE

## I

## GALVANOMÈTRES

### GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE ET A BOBINE FIXE

**Galvanomètres lord Kelvin.** — Les galvanomètres lord Kelvin, connus également sous le nom de galvanomètres Thomson, sont des galvanomètres astatiques. Plusieurs modèles de ce galvanomètre ont été exposés par divers constructeurs.

Modèles Ducretet. — M. E. Ducretet, de Paris, construit des galvanomètres lord Kelvin à une paire de bobines (*fig.* 1). L'équipage mobile comporte deux petits aimants astatiques B et AB′ et un petit miroir M, reliés entre eux d'une manière rigide par un fil d'aluminium; le tout est suspendu, comme le montre la figure 1, à un fil de cocon sans torsion. L'un des aimants B se trouve au centre du cadre galvanométrique circulaire BO renfermé dans une cage en laiton que supporte un trépied muni de vis calantes. L'aimant AB′ est placé à l'intérieur d'une petite cavité, et sert en même temps d'amortisseur à air. Un aimant directeur recourbé BB′, supporté par une tige verticale, est placé au-dessus de la cage cylindrique; cet aimant sert à faire varier la sensibilité de l'instrument en modifiant la hauteur à laquelle on le fixe; à cet effet, l'aimant porte en

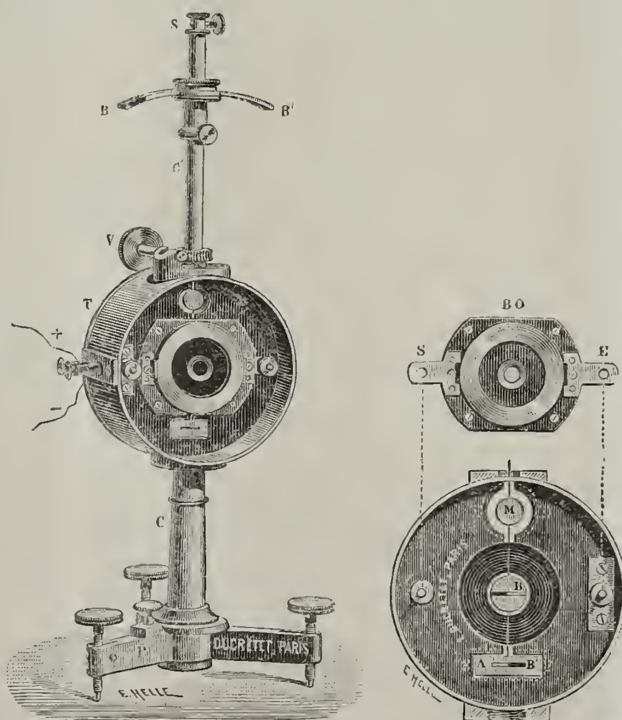


Fig. 1. — Galvanomètre lord Kelvin à une seule paire de bobines, modèle E. Ducretet.

son centre un manchon en laiton qui peut glisser à frottement doux sur la tige verticale lui servant de support et une vis de pression permet de l'immobiliser. Une vis tangente V sert à faire tourner lentement sur elle-même, dans un sens ou dans l'autre, la tige verticale et, avec elle, l'aimant directeur.

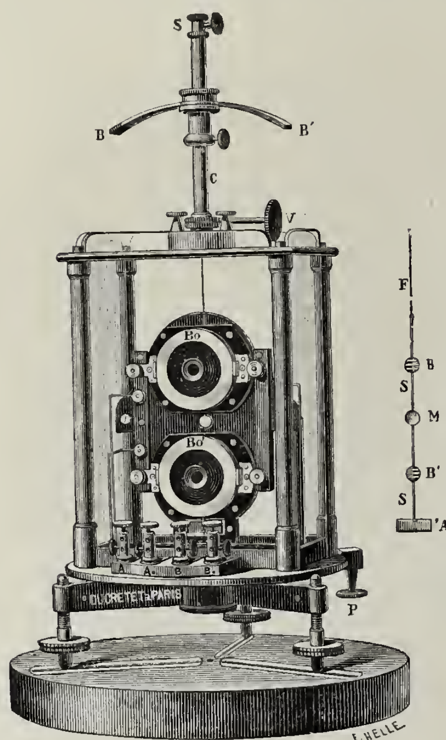



Fig. 2. — Galvanomètre lord Kelvin à deux paires de bobines, modèle E. Ducretet.

Dans le modèle de galvanomètre lord Kelvin à deux paires de bobines, construit par M. E. Ducretet (*fig.* 2), l'équipage mobile est constitué par deux séries de petits aimants B, B', reliées entre elles d'une manière rigide par un fil d'aluminium et constituant un système astatique. Ce fil porte, en son centre, un petit miroir circulaire M et, à son extrémité inférieure, une petite lame placée dans une petite chambre constituant l'amortisseur à air. Cet équipage mobile est suspendu par un simple fil de cocon que l'on attache au crochet que porte une vis S, fixée à l'extrémité de la tige creuse C servant de support à l'aimant directeur BB'. Le cadre galvanométrique comporte deux bobines circulaires B*o* et B*o*', une inférieure et une supérieure, chacune d'elles étant divisée en deux moitiés, indépendantes et amovibles, séparées par une carcasse verticale. Une des extrémités de l'enroulement de chaque demi-bobine est reliée à l'une des quatre bornes fixées sur le socle, les extrémités opposées étant reliées entre elles.

Dans ces galvanomètres de grande sensibilité, la résistance du cadre galvanométrique est d'environ 5 000 ohms; il se construit également des modèles où cette résistance atteint 8 000 ohms.

La facilité avec laquelle on peut enlever les bobines permet d'en avoir une série de rechange. On peut ainsi effectuer avec un seul instrument les mesures les plus diverses, suivant que l'on utilise des bobines de résistances faible ou élevée, et grâce aussi à la faculté que donnent les quatre bornes de n'utiliser qu'une seule paire de bobines ou les deux, couplées en série ou en parallèle.

Modèles J. Carpentier. — Le galvanomètre lord Kelvin, modèle J. Carpentier (*fig.* 3), a un équipage mobile constitué par deux séries de petits aimants de 1 cm de longueur (*fig.* 4), reliés entre eux d'une manière rigide par un fil d'aluminium et constituant un système astatique. Ce fil d'aluminium porte en son milieu un petit miroir circulaire, d'environ 1 cm de diamètre, ainsi qu'une petite ailette en aluminium ou en mica servant d'amortisseur. Cet équipage mobile est suspendu par un simple fil de cocon sans torsion que l'on attache au crochet que porte un bouton V (*fig.* 3) glissant à frottement dans une douille en laiton fixée à la partie supérieure de la carcasse de l'instrument par deux petites vis *v*, *v'*. Ce bouton V peut être élevé ou abaissé à volonté; lorsqu'on l'abaisse à fond, le fil de cocon n'est plus tendu et on peut déplacer l'instrument sans s'exposer à rompre ce fil de suspension.

Une ouverture est ménagée au centre de l'instrument, dans l'intervalle séparant la bobine inférieure de la bobine supérieure, afin de donner passage aux rayons lumineux qui doivent frapper le miroir.

Le cadre galvanométrique est fixé sur une carcasse en laiton reposant sur un socle en ébonite muni de trois vis calantes et d'un niveau à bulle d'air. Ce cadre se compose de deux bobines circulaires, une inférieure et une supérieure, chacune d'elles étant divisée en deux moitiés indépendantes séparées par la carcasse verticale en laiton. La demi-bobine supérieure

et la demi-bobine inférieure d'un même côté de la carcasse sont montées sur une platine unique en ébonite. Les deux platines, antérieure et postérieure, garnies chacune de la demi-

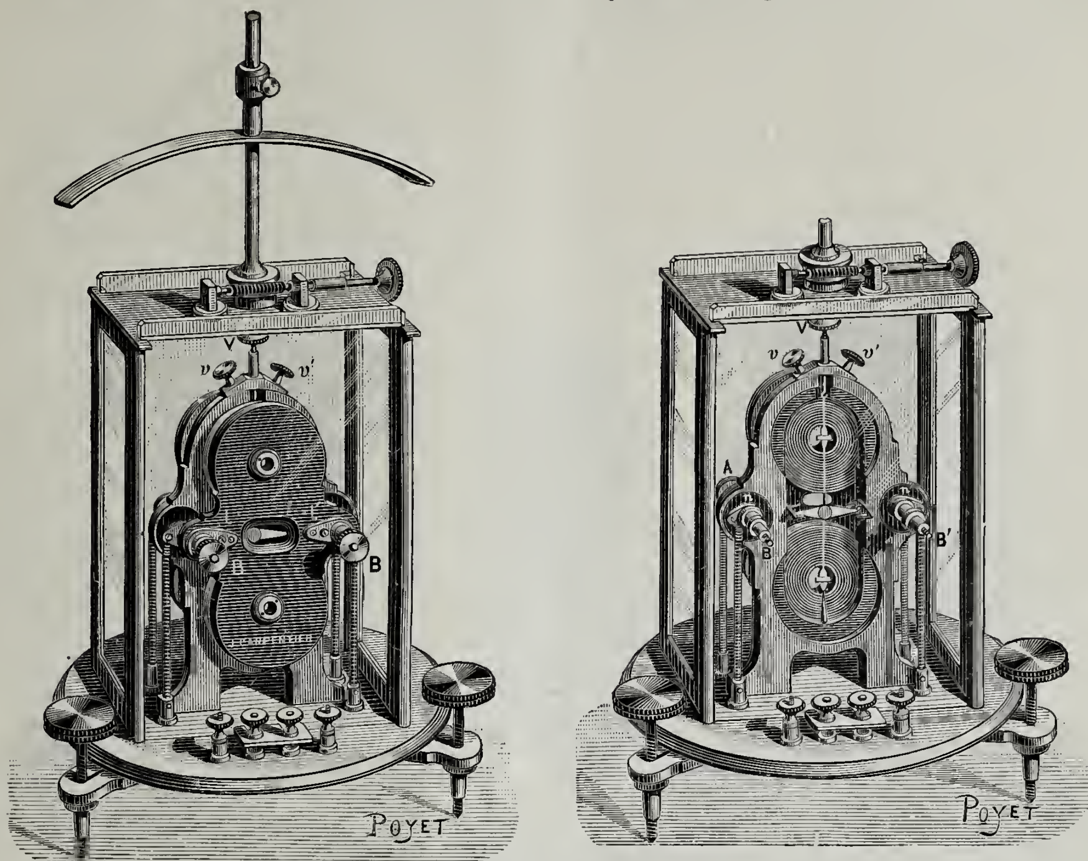



Fig. 3. — Galvanomètre lord Kelvin, modèle J. Carpentier.

bobine inférieure et de la demi-bobine supérieure, se fixent respectivement sur une des faces de la carcasse en laiton verticale à l'aide de deux boutons B, B', qui se vissent sur des tiges filetées adaptées à la carcasse. Cette disposition permet de démonter très facilement l'instrument pour vérifier l'équipage mobile ou pour remplacer le fil de cocon qui le supporte; en outre, les bobines étant amovibles, on peut les remplacer par d'autres ayant une résistance différente. Une des extrémités de l'enroulement de chaque demi-bobine est reliée à l'une des quatre bornes fixées sur le socle; les extrémités opposées sont reliées entre elles par l'intermédiaire des tiges filetées sur lesquelles se fixent les boutons B, B'.

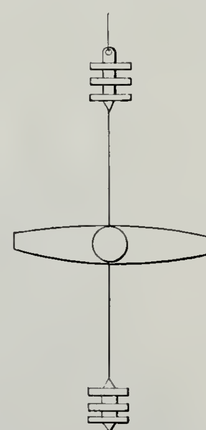


Fig. 4. — Équipage mobile du galvanomètre lord Kelvin, modèle J. Carpentier.

Dans les galvanomètres de grande sensibilité, les bobines sont enroulées avec du fil de cuivre de 0,1 mm de diamètre et chaque moitié de bobine, comportant environ 12 000 spires, a une résistance de 3 000 ohms. Dans d'autres galvanomètres moins sensibles, l'enroulement est fait en fil de cuivre de 1 mm; la résistance de chaque demi-bobine n'est plus alors que de 3 ohms.

Avec une série de bobines de rechange, le même galvanomètre peut être utilisé pour effectuer les mesures les plus diverses en employant des bobines de résistance appropriée.

Un aimant directeur, placé au-dessus de la cage en verre qui protège le galvanomètre, sert à faire varier la sensibilité de l'instrument et aussi à ramener l'équipage mobile au zéro de l'échelle.

M. J. Carpentier construit également des galvanomètres lord Kelvin n'ayant qu'une seule paire de bobines. Leur construction est analogue à celle des galvanomètres à deux paires de bobines.

Modèle Keyser et Schmidt. — MM. Keyser et Schmidt, de Berlin, ont exposé un modèle de galvanomètre lord Kelvin, construit d'après les indications du professeur Szymanski qui a eu surtout en vue d'établir un modèle dont le prix de construction soit peu élevé.

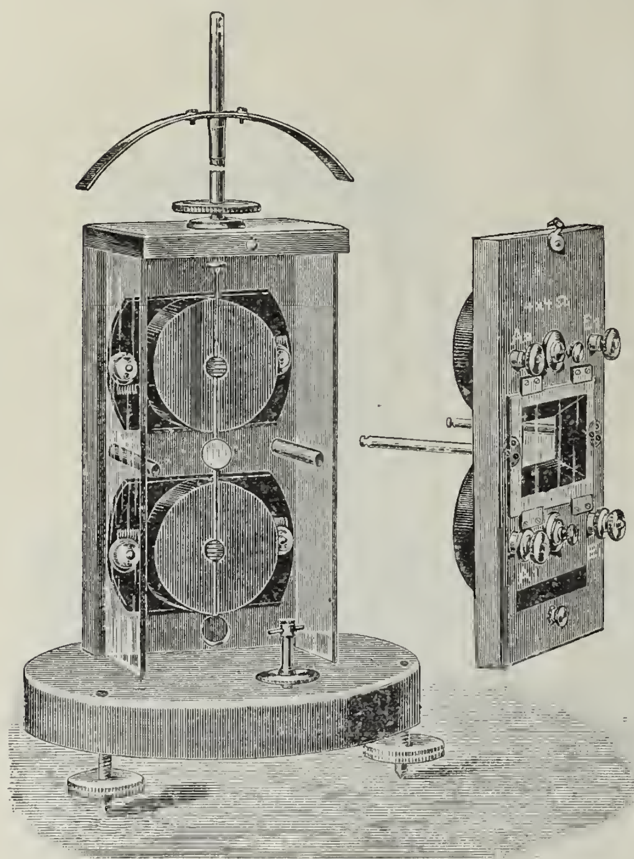


Fig. 5. — Galvanomètre lord Kelvin, modèle Keyser et Schmidt.

Dans cet instrument (*fig.* 5), les quatre bobines sont constituées par du fil de cuivre aggluliné et sont simplement garnies de papier, puis collées à la gomme laque sur des plaques d'ébonite qui leur servent de support. Les bobines d'avant sont montées sur une planchette, représentée à droite de la figure, et peuvent s'enlever facilement pour permettre de vérifier l'équipage mobile, qui ne présente rien de particulier. Pour que cette planchette soit toujours dans la même position, elle est munie de deux tiges horizontales que l'on glisse dans des tubes fixés à la planchette d'arrière; un simple crochet suffit pour l'immobiliser.

Un aimant directeur est placé sous le socle et se manœuvre à l'aide d'une vis qui traverse ce socle; l'aimant directeur supérieur est commandé par un bouton moletté, la vis tangente utilisée d'ordinaire ayant été abandonnée comme étant de construction trop coûteuse.



Fig. 6. — Équipage mobile du galvanomètre lord Kelvin, modèle James White.

Ce galvanomètre est destiné particulièrement aux élèves qui effectuent des mesures à titre d'exercice pratique.

Modèle J. White. — M. James White, de Glasgow, le constructeur des instruments de lord Kelvin, exposait un modèle de galvanomètre à deux paires de bobines, analogue à ceux qui viennent d'être décrits et dont il ne diffère que par la disposition donnée à l'équipage mobile (*fig.* 6); le miroir est collé sur le groupe d'aimants supérieur et l'amortisseur est placé sur le groupe d'aimants inférieur.

**Galvanomètre astatique Broca.** — Le galvanomètre Broca, construit et exposé par M. J. Carpentier, est un galvanomètre astatique de grande sensibilité. L'équipage mobile (*fig.* 7) est constitué par deux longues aiguilles verticales NSN, SNS, pouvant tourner autour d'un axe vertical formé par un fil de cocon. Ces aiguilles, qui doivent être rigoureusement parallèles, sont aimantées de façon à avoir en leur milieu un pôle conséquent; le point conséquent de l'une des aiguilles étant *nord* et celui de l'autre étant *sud*,

M. Broca a placé les aiguilles dans une position rigoureusement verticale avec les pôles de noms contraires en regard pour obtenir un système astatique.

Les bobines fixes de ce galvanomètre sont de petites dimensions et leur centre se trouve à la hauteur des pôles conséquents des aiguilles; les extrémités de ces dernières dépassent les bobines, qui agissent ainsi sur le flux allant d'un pôle conséquent à l'autre. Dans ces conditions, le système est astatique par lui-même et les deux aiguilles peuvent avoir des aimantations sensiblement différentes, sans qu'il en résulte aucun inconvénient, l'équipage mobile étant ainsi à l'abri des champs magnétiques extérieurs.

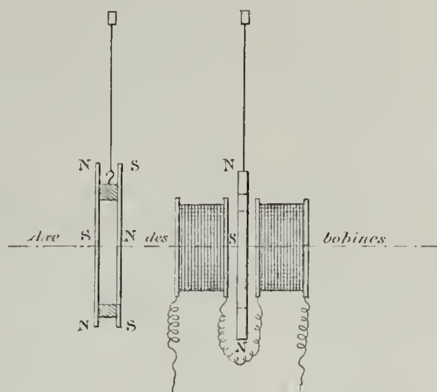


Fig. 7. — Équipage mobile du galvanomètre Broca.

L'aimant directeur ordinaire des galvanomètres lord Kelvin a été remplacé par deux petites aiguilles aimantées très fines et placées, l'une normalement aux bobines fixes, l'autre parallèlement et à la hauteur de l'un des pôles de l'équipage mobile. Ces aiguilles ne peuvent prendre que des mouvements de translation dans de petits tubes à frottement doux. L'aiguille normale sert à annuler, une fois pour toutes, les forces qui dévient l'équipage de sa position d'observation; l'aiguille parallèle aux bobines est utilisée pour faire varier la valeur de la force directrice.

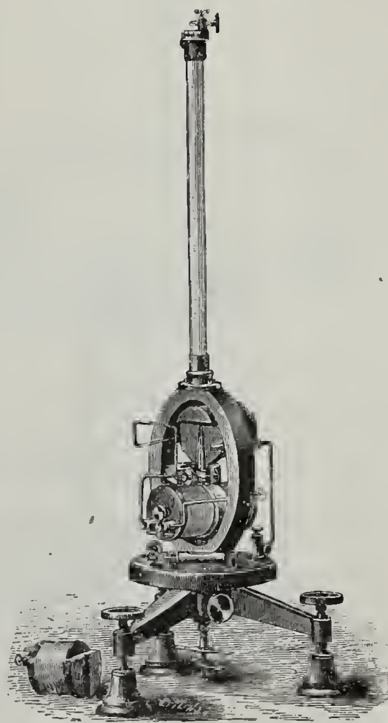
Le galvanomètre Broca convient tout particulièrement aux mesures délicates de recherches physiologiques et de thermo-électricité.

**Galvanomètre astatique Hartmann et Braun.** — Cet instrument (*fig.* 8) se compose d'un anneau en bronze vertical fixé sur un socle muni de trois vis calantes.

Cet anneau sert de support à deux groupes de chacun deux bobines fixes, dont les axes sont parallèles. Ces bobines peuvent être facilement retirées, soit pour les changer, soit pour vérifier l'équipage mobile.

L'équipage mobile à miroir affecte deux dispositions. La première (*fig.* 9) comporte deux petits fils d'acier aimantés et verticaux, réunis par deux petites traverses. A la traverse supérieure s'accroche le fil de cocon ou la fibre de quartz qui supporte l'équipage. Ce fil de suspension est fixé, par son extrémité supérieure, à un treuil disposé en haut d'un tube de verre qui surmonte l'instrument et à l'intérieur duquel passe le fil de suspension.

La seconde disposition (*fig.* 10) comporte quatre petits aimants au lieu de deux. Seules, les extrémités du haut et du bas de cet équipage sont influencées par le courant qui traverse les bobines, les pôles intermédiaires se trouvant en dehors de leur champ d'action. Cette disposition, qui rappelle celle avec pôles conséquents de l'équipage du galvanomètre Broca, donne une astaticité presque parfaite, malgré les différences d'aimantation qui peuvent exister entre les divers fils d'acier.


Fig. 8. — Galvanomètre astatique à miroir Hartmann et Braun.

Les aimants directeurs, au nombre de deux, peuvent se croiser plus ou moins.

Les vis calantes reposent sur des dés en ébonite, afin d'isoler parfaitement le galvanomètre.

Chacune des quatre bobines a une résistance de 2500 ohms. Ces bobines présentent cette particularité que le diamètre du fil de leur enroulement augmente à mesure que l'on s'éloigne du centre. De cette manière, bien que le diamètre des spires aille en augmentant, chacune d'elles a la même résistance, sa section augmentant en même temps que le diamètre d'enroulement.

Un courant ayant une intensité de $25 \cdot 10^{-10}$ ampère produit une déviation de 1 mm sur une échelle distante de 1 m.

On peut remplacer l'équipage qui vient d'être décrit par un autre formé d'un tube d'acier, long et mince, fendu en deux parties suivant sa longueur. Les deux moitiés de ce tube sont fixées et maintenues écartées par deux traverses, dont l'une sert d'attache au fil de cocon. Le miroir est placé vers le milieu, et la partie inférieure du tube tourne à l'intérieur d'une boîte en cuivre rouge. Ce dispositif d'amortissement est susceptible d'être réglé jusqu'à l'apériodicité; il suffit d'enlever la boîte en cuivre pour supprimer complètement l'amortissement.

Fig. 9. — Équipage mobile du galvanomètre Hartmann et Braun. Première disposition.

Fig. 10. — Équipage mobile du galvanomètre Hartmann et Braun. Seconde disposition.

Enfin, on peut substituer aux divers équipages décrits l'équipage lord Kelvin, du modèle bien connu, formé de deux séries de petits aimants horizontaux.

**Galvanomètre astatique et apériodique à lunette Hartmann et Braun.** — Ce galvanomètre (*fig.* 11), construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort, a un équipage mobile constitué par un aimant en forme de cloche suspendu à un fil de cocon et sur lequel agit

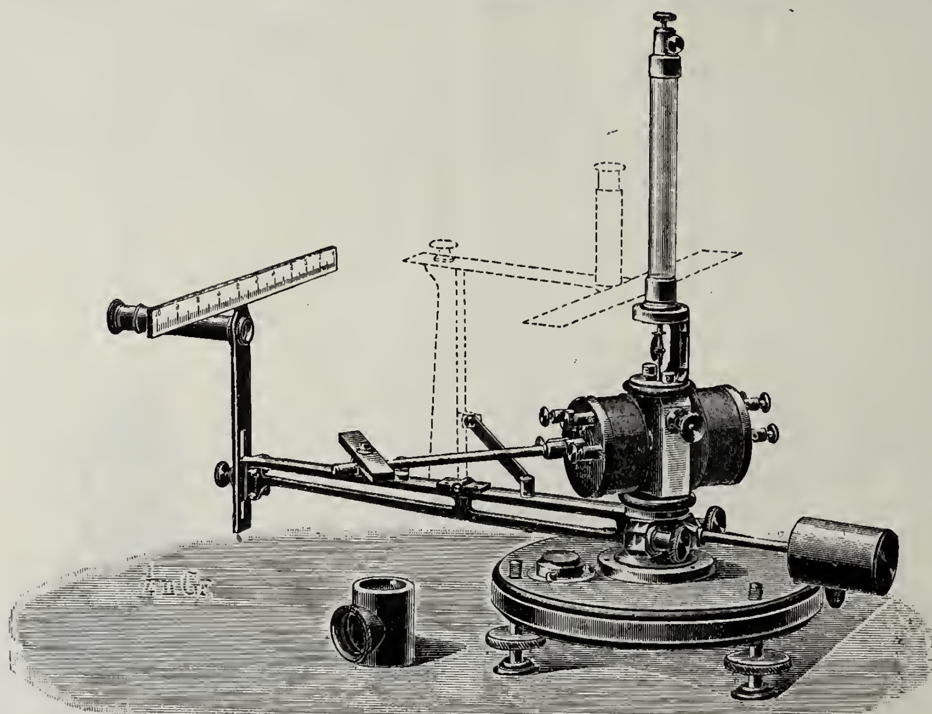


Fig. 11. — Galvanomètre apériodique à miroir Hartmann et Braun.

le flux développé par le passage du courant dans deux bobines fixées de part et d'autre de cet aimant. Les bobines sont amovibles et peuvent être facilement remplacées par d'autres, suivant le genre de mesures à effectuer; la résistance totale des diverses séries de bobines est de 4 000, 2 000, 1 000 et 100 ohms. On peut aussi coupler les bobines en série ou en quantité.

L'instrument est monté sur un socle muni de trois vis calantes et d'un niveau à bulle d'air. Autour de l'axe central peut pivoter un chariot porte-lunette, soigneusement équilibré par un contrepoids.

Les oscillations de l'équipage mobile sont amorties jusqu'à l'apériodicité, grâce à l'enveloppe de cuivre qui l'entoure.

Un aimant directeur, placé latéralement à l'extrémité d'un support horizontal, permet de rendre le système presque astatique en annulant en grande partie l'action du champ magnétique terrestre.

La lunette, de 10 mm d'ouverture et de 6 cm de distance focale, donnant un grossissement et une clarté suffisante, est montée ainsi que l'échelle sur un bras articulé que porte le chariot.

La sensibilité de ce galvanomètre est telle que l'on obtient une déviation de 1 mm sur l'échelle avec un courant d'une intensité de 9 microampères et la série de bobines de 100 ohms, sans utiliser l'aimant directeur.

Afin de pouvoir transporter l'instrument sans inconvénient, il est muni d'un dispositif d'arrêt de l'équipage mobile. Il suffit de tourner un bouton moletté pour bloquer l'aimant en forme de cloche.

**Galvanomètre astatique Siemens et Halske.** — L'équipage mobile de ce galvanomètre est constitué par deux petits aimants en forme de cloche (*fig.* 12) fixés sur un fil d'aluminium. Ces aimants sont obtenus en étampant un petit disque en acier mince et en lui donnant la forme d'une capsule que l'on découpe ensuite.

Les deux aimants de l'équipage mobile ont leurs pôles orientés suivant SN et *ns*, de manière à rendre le système astatique; la distance qui les sépare est telle qu'ils se trouvent chacun suspendu à la hauteur du centre de la paire de bobines à laquelle ils sont affectés.

Un miroir *m*, placé entre les deux aimants, est également fixé sur le fil d'aluminium. Ce dernier est attaché à un long fil de cocon placé et suspendu à l'intérieur du tube vertical qui surmonte les bobines (*fig.* 13).

Fig. 12. — Équipage mobile du galvanomètre astatique Siemens et Halske.

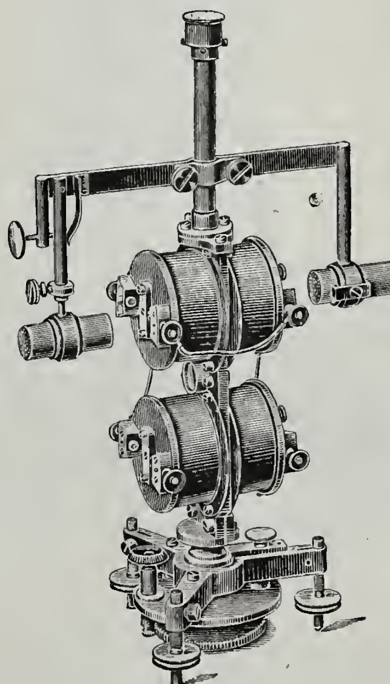


Fig. 13. — Galvanomètre astatique Siemens et Halske.

Les deux paires de bobines fixes de ce galvanomètre sont amovibles et peuvent être remplacées par d'autres ayant des résistances appropriées aux mesures à effectuer. On obtient le maximum de sensibilité avec deux paires de bobines, ayant chacune 4 000 ohms de résistance, soit une résistance totale de 16 000 ohms.

Ce galvanomètre comporte deux aimants directeurs logés sous le socle de l'instrument entre les vis calantes. Ces aimants sont manœuvrés ensemble ou séparément, à l'aide d'un bouton moletté qui commande un pignon denté. L'emploi de deux aimants directeurs, que l'on peut croiser plus ou moins, remplace avantageusement la disposition qui consistait à donner plus ou moins de sensibilité au galvanomètre en n'utilisant qu'un seul aimant que l'on éloignait ou que l'on rapprochait de l'équipage mobile.

Le bras horizontal qui surmonte les bobines sert de support à deux cylindres de fer doux dont l'un est fixe, tandis que l'autre peut recevoir de très faibles déplacements. Ce dispositif, qui rappelle les masses compensatrices des compas de marine, sert à mettre le galvanomètre à l'abri de l'influence des actions magnétiques extérieures, mais moins complètement, cependant, que ne le ferait une enveloppe circulaire en fer, comme en ont les galvanomètres cuirassés.

La sensibilité du galvanomètre astatique Siemens et Halske, avec bobines ayant 16 000 ohms de résistance, est telle qu'un courant de $0{,}6 \cdot 10^{-9}$ ampère produit une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 mètre de distance.

**Galvanomètres cuirassés du Bois-Rubens.** — Ces galvanomètres, construits et exposés par la Société Siemens et Halske, de Berlin, ont été étudiés en vue d'obtenir une très grande sensibilité et d'éviter l'influence des actions magnétiques extérieures.

Il se construit deux modèles de ce galvanomètre (*fig.* 14).

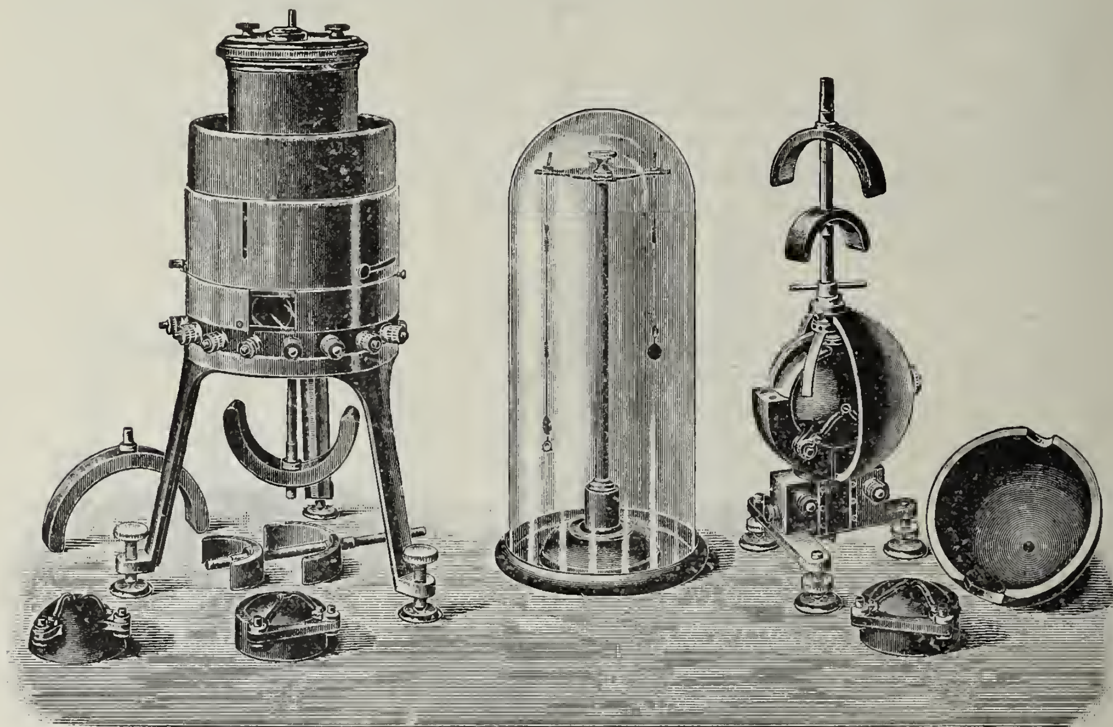


Fig. 14. — Galvanomètres cuirassés du Bois-Rubens.

L'équipage mobile est constitué par de petites aiguilles aimantées, collées derrière un petit miroir, comme dans les galvanomètres lord Kelvin ; cet équipage est porté par un fil de cocon sans torsion. Chaque galvanomètre est muni de deux équipages mobiles que l'on voit, sous une cloche en verre, sur la figure 14. L'un est l'équipage ordinaire ; l'autre, excessivement léger, est utilisé toutes les fois que l'on veut obtenir la sensibilité maximum de l'instrument.

Dans le petit modèle, qui ne comporte qu'une paire de bobines et qui est représenté figure 14 sur la droite, les bobines sont placées à l'intérieur d'enveloppes hémisphériques en acier coulé.

Autour de la première sphère, constituée par deux de ces enveloppes, se trouvent deux aimants directeurs recourbés en arc de cercle, ce qui leur permet de se mouvoir entre la sphère centrale et une seconde sphère extérieure en fer qui entoure complètement la première, à une distance de 25 mm. Au-dessus de cet ensemble, une tige verticale supporte deux autres aimants directeurs pouvant glisser à frottement doux sur la tige leur servant de support.

Dans le grand modèle de galvanomètre, représenté sur la gauche de la figure 14 et qui comporte deux paires de bobines fixes, les deux enveloppes concentriques en fer sont cylindriques, l'enveloppe intérieure pouvant tourner sur elle-même et l'enveloppe extérieure pouvant se déplacer verticalement.

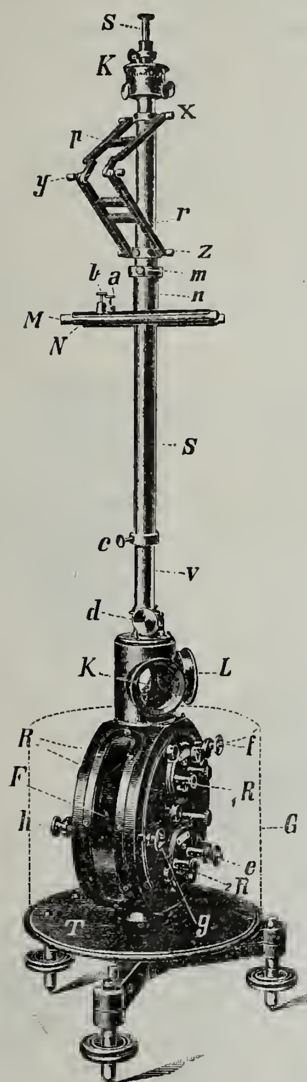



Fig. 15.
Microgalvanomètre Rosenthal.

Cet instrument comporte, en outre, quatre aimants directeurs extérieurs pouvant se croiser plus ou moins ; deux sont mobiles sur une tige inférieure ; les deux autres peuvent glisser sur un tube surmontant les bobines et à l'intérieur duquel se trouve le fil de suspension de l'équipage.

Chaque galvanomètre est livré avec une série de quatre bobines facilement amovibles et que l'on peut remplacer par d'autres, de résistances différentes. Les trois séries comportent chacune quatre bobines ayant respectivement des résistances de 2 000, 100 ou 5 ohms.

Ces galvanomètres sont très sensibles. C'est ainsi que, lorsque la durée d'oscillation est de cinq secondes et que l'échelle est placée à 2 m du miroir, on obtient, avec le galvanomètre grand modèle muni de son équipage léger, une déviation de 1 000 mm avec un courant d'une intensité de 1 microampère.

Les cuirasses en fer dont sont munis ces galvanomètres doivent, pour exercer une protection efficace, avoir une épaisseur minimum de 6 mm.

**Microgalvanomètre astatique Rosenthal.** — Le Dr Th. Edelmann, de Munich, exposait cet instrument (*fig.* 15), qui dérive du galvanomètre lord Kelvin.

L'équipage mobile comporte un aimant en forme de Z, étroit et relativement haut, dont les branches horizontales ont même polarité ; un pôle conséquent se trouve au milieu de la branche verticale (*fig.* 16).

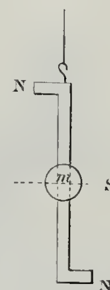



Fig. 16. — Équipage du microgalvanomètre Rosenthal.

Les branches horizontales de cet aimant pénètrent au milieu des bobines $R_1$ et $R_2$, dont les bornes d'entrée se trouvent en *e* et en *f*. Ces bobines s'appliquent sur un anneau F fixé sur le socle T et sont maintenues par les vis *g* et *h*. Cette disposition permet de remplacer rapidement les bobines par d'autres de résistance appropriée aux mesures à effectuer et aussi d'avoir accès à l'équipage mobile. Une cage en fer G met l'instrument à l'abri des influences magnétiques extérieures.

Au-dessus de l'anneau F se trouve la chambre du miroir, fermée par des bonnettes et formant amortisseur à air. Le miroir reçoit le rayon lumineux par l'ouverture L et le renvoie sur l'échelle par l'ouverture K.

Au-dessus de la chambre du miroir se trouve le tube V, qui supporte un autre tube concen-

trique SS. Une vis tangente *d* permet de faire tourner le tube V autour de son axe. Le fil de cocon ou la fibre de quartz, supportant l'équipage mobile, s'enroule sur un petit treuil K qui en porte enroulée une certaine longueur.

Le tube S peut s'abaisser ou se relever d'une certaine quantité, permettant ainsi l'emploi d'un fil de suspension plus ou moins long. Un parallélogramme articulé Z*yp*X limite la course de ce mouvement télescopique et des colliers d'arrêt *c* et *m* immobilisent le tube dans la position voulue.

Deux aimants directeurs cylindriques MN coulissent dans des tubes fendus, soudés sur le tube S leur servant de support. Des vis de pression *a* et *b* permettent de les fixer dans la position qu'on leur a donnée. En faisant sortir ces aimants de leur gaine, l'un vers la gauche, l'autre vers la droite, on allonge le système directeur et l'on augmente son effet; lorsque, au contraire, ces aimants sont rentrés dans leur gaine, le système directeur n'agit plus, car les pôles en regard sont de signes contraires.

Lorsqu'on agit sur le treuil K dans le sens convenable, on allonge le fil de suspension et, par conséquent, on augmente la sensibilité de l'instrument. En même temps, une crémaillère fait monter le tube d'une même quantité, de telle sorte que le miroir reste toujours à la même hauteur, quelles que soient les variations de longueur du fil de suspension.

Ce galvanomètre a une sensibilité telle que l'on obtient une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 m, lorsque l'intensité du courant qui traverse les bobines a seulement une valeur de $0{,}1 \cdot 10^{-12}$ ampère.

**Galvanomètres Wiedemann.** — Plusieurs galvanomètres genre Wiedemann figuraient à l'Exposition; ils étaient exposés par MM. E. Ducretet, de Paris; Hartmann et Braun, de Francfort, et Edelmann, de Munich.

Modèle E. Ducretet. — Le galvanomètre Wiedemann-d'Arsonval, construit et exposé par M. E. Ducretet (*fig.* 17), peut être utilisé à volonté comme galvanomètre apériodique ou comme galvanomètre balistique.

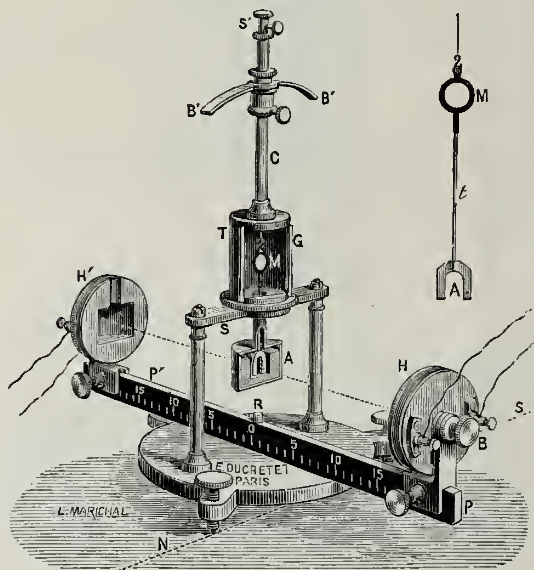



Fig. 17. — Galvanomètre Wiedemann-d'Arsonval.

L'équipage mobile est constitué par un petit aimant A, en forme de fer à cheval, fixé à l'extrémité de la tige *t* qui porte le miroir M. Cet équipage est suspendu à l'aide d'un fil de cocon sans torsion.

Le miroir M est placé à l'intérieur d'un tambour fermé par une glace et peut recevoir toutes les orientations sans qu'il soit nécessaire de toucher aux autres organes de l'instrument.

Pour rendre l'instrument apériodique, on amortit les oscillations de l'équipage mobile en plaçant l'aimant A dans une cavité creusée dans une masse de cuivre rouge. Lorsqu'on veut utiliser l'instrument comme galvanomètre balistique, on enlève la masse de cuivre pour permettre aux oscillations de s'effectuer librement; en agissant convenablement sur l'aimant directeur, on obtient des oscillations suffisamment lentes.

La bobine est divisée en deux parties qui peuvent se déplacer le long d'une règle divisée, permettant ainsi de faire varier à volonté la sensibilité de l'instrument. On peut également avoir plusieurs bobines ayant une résistance plus ou moins grande.

Un aimant directeur BB' sert à faire varier, suivant les besoins, l'intensité et la direction du champ.

**Modèle Hartmann et Braun.** — Dans ce galvanomètre (*fig.* 18), l'équipage mobile comporte un aimant, en forme de cloche, de dimensions très réduites. La masse de cuivre de l'amortisseur a été considérablement diminuée sans nuire à l'apériodicité, ce qui a permis de rapprocher les bobines des pôles de l'aimant et d'augmenter ainsi la sensibilité de l'instrument.

La résistance totale des deux demi-bobines couplées en série est de 400 ohms. Elles peuvent être déplacées le long d'une règle graduée à l'aide d'une crémaillère. Un écran en fer doux entoure l'ensemble de la partie mobile et la protège contre les actions magnétiques extérieures. Cet écran est formé de deux anneaux épais pouvant tourner l'un par rapport à l'autre, afin de croiser les pôles qu'ils pourraient présenter et d'annuler leurs effets.

L'enroulement des bobines est fait avec un double fil, ce qui permet d'obtenir divers couplages et, par suite, diverses résistances, qui sont la moitié, le quart, le huitième ou le seizième de la résistance totale. Des bornes fixées sur chaque demi-bobine facilitent l'opération des divers couplages désirés et leur mode de montage a été étudié pour que l'on puisse les remplacer facilement par d'autres.

Un aimant directeur, monté sur un collier en

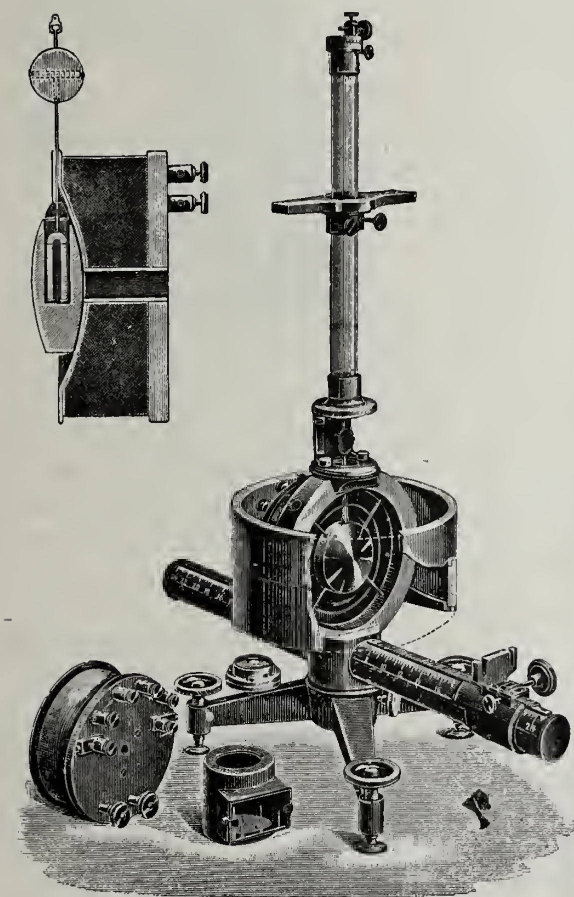


Fig. 18. — Galvanomètre apériodique Hartmann et Braun, grand modèle.

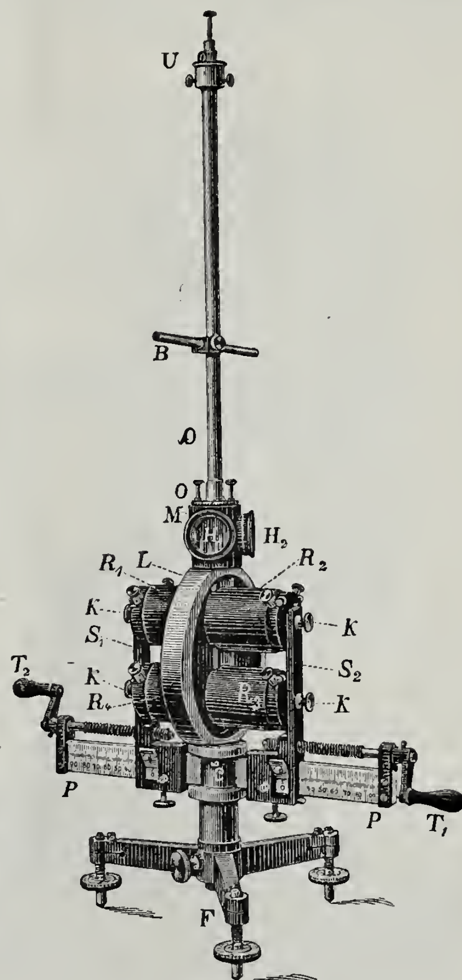



Fig. 19. — Galvanomètre Wiedemann, modèle Edelmann.

laiton, est mobile sur le tube de cristal qui renferme le fil de suspension de l'équipage mobile.

Ce galvanomètre, avec les enroulements groupés en série, par conséquent, ayant une résistance de 400 ohms, l'écran de fer doux étant enlevé, a une sensibilité telle que l'on obtient une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 m, avec un courant d'une intensité de $0{,}8 . 10^{-7}$ ampère.

**Modèle Edelmann.** — La figure 19 montre le galvanomètre construit et exposé par le Dr Edelmann, de Munich.

L'aimant, en forme de cloche, est suspendu par une fibre de quartz enfermée dans un tube OU, le long duquel peut se déplacer un aimant directeur B.

Les bobines $R_1$, $R_4$ et $R_2$, $R_3$ sont fixées par des vis K sur les chariots $S_1$, $S_2$. Ces chariots coulissent le long d'une règle graduée PP et peuvent recevoir un déplacement micrométrique lorsqu'on agit sur les manivelles $T_1$, $T_2$. La distance qui sépare les chariots de l'équipage mobile s'apprécie très exactement au moyen des verniers dont ils sont munis.

L'ensemble de l'instrument peut tourner autour de son axe pour obtenir l'orientation convenable.

Le miroir se trouve protégé par une chambre munie de deux bonnettes $H_1$ et $H_2$. L'aimant de l'équipage mobile se meut à l'intérieur d'une cavité ménagée dans un bloc de cuivre rouge qui produit l'amortissement et que l'on peut enlever à volonté après avoir écarté les bobines.

La déviation obtenue sur une échelle placée à 1 m du miroir atteint 300 mm, lorsque les bobines sont complètement rapprochées de l'équipage mobile, c'est-à-dire lorsque l'instrument a son maximum de sensibilité.

## GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE ET A BOBINE MOBILE

**Galvanomètres Deprez-d'Arsonval.** — Les galvanomètres Deprez-d'Arsonval, à aimant fixe et à bobine mobile, sont aujourd'hui très employés et tous les constructeurs d'instruments de mesure ont réalisé des modèles basés sur le principe du galvanomètre qui a servi de type.

Modèles J. Carpentier. — La figure 20 représente un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir, construit par M. J. Carpentier.

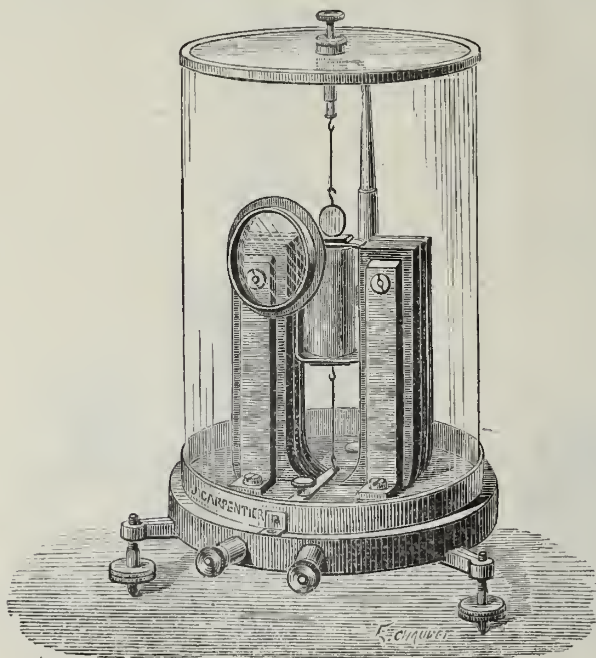



Fig. 20. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, à miroir, modèle J. Carpentier.

Entre les branches d'un aimant en fer à cheval, placé verticalement, est suspendu un cadre galvanométrique rectangulaire en fil très fin et faisant un grand nombre de tours. A l'intérieur de ce cadre est un cylindre creux de fer doux, destiné à diminuer la réluctance magnétique et, par conséquent, à augmenter le flux traversant le cadre galvanométrique. La suspension du cadre est constituée par deux fils d'argent, l'un placé au-dessus, l'autre au-dessous et reliés respectivement, par une de leurs extrémités, à l'entrée et à la sortie du cadre ; les extrémités opposées de ces fils sont fixées à deux points d'attache, afin que le cadre mobile puisse tourner autour de ces deux fils tendus qui lui servent d'axe. Le fil de suspension supérieur est attaché à l'extrémité d'une tige mobile dans une douille que porte une potence métallique fixée sur le socle de l'instrument ; cette tige mobile peut être élevée ou abaissée, afin de placer le cadre à la hauteur convenable, et aussi recevoir un mouvement de rotation pour orienter l'équipage mobile et l'amener au zéro de l'échelle. Le fil de suspension du bas vient s'attacher, par son extrémité inférieure, à une lame élastique dont la tension peut être réglée par une vis.

Les deux fils de suspension servent en même temps de conducteurs et, à cet effet, une de

leurs extrémités est reliée à une des bornes du galvanomètre par l'intermédiaire de la potence métallique, d'une part, et de la lame élastique, de l'autre, tandis que les extrémités opposées sont reliées au cadre galvanométrique.

Le couple qui résulte de la torsion des fils de suspension, sous l'action des déviations angulaires du cadre, sert à mesurer l'action réciproque de l'aimant et du cadre, lorsque ce dernier est parcouru par un courant. Le cadre porte à sa partie supérieure un petit miroir qui permet de mesurer les angles de torsion avec une grande précision par la méthode objective.

Le cadre galvanométrique de ce modèle d'instrument pour mesures courantes a une résistance de 200 ohms environ. Un courant de 0,5 microampère donne une déviation de 1 mm sur une échelle placée à 1 m de distance du miroir.

La production de courants induits dans le cadre, par suite de ses mouvements dans le champ magnétique de l'aimant, détermine l'apériodicité du galvanomètre, lorsque la résistance totale du circuit a une valeur convenable.

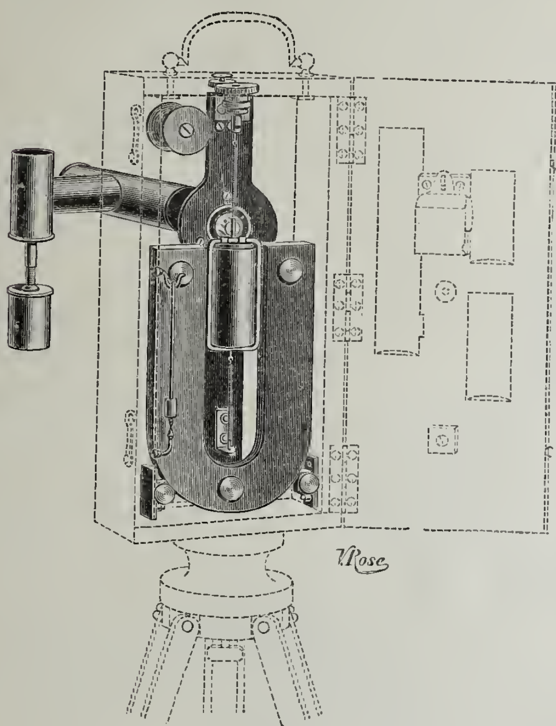



Fig. 21. — Galvanomètre à microscope, modèle J. Carpentier.

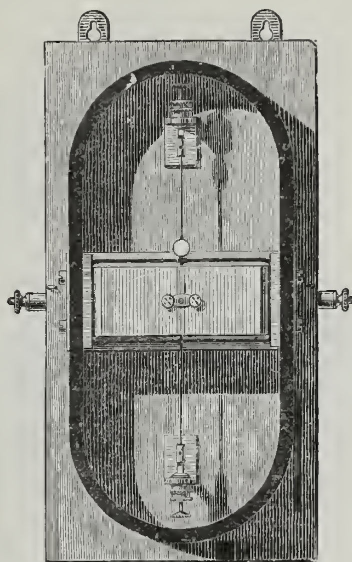


Fig. 22. — Galvanomètre balistique Deprez-d'Arsonval, modèle J. Carpentier.

M. J. Carpentier avait exposé une série de galvanomètres Deprez-d'Arsonval de construction analogue. Dans certains modèles, le miroir est remplacé par une aiguille indicatrice qui se déplace devant une graduation; dans d'autres, soit à miroir, soit à aiguille indicatrice, le galvanomètre est différentiel et la bobine mobile comporte alors naturellement deux enroulements. Un autre modèle a une suspension unifilaire, le retour du courant s'effectuant par l'intermédiaire d'un contact à mercure. Enfin, un modèle spécial, destiné aux mesures pyrométriques (*fig.* 21), comporte un microscope permettant de lire facilement les plus faibles déviations.

Le galvanomètre balistique que représente la figure 22 est également du système Deprez-d'Arsonval; on a rendu plus grand le moment d'inertie en augmentant le nombre de tours de l'enroulement de la bobine mobile et aussi ses dimensions. Le cadre mobile est très allongé dans le sens horizontal et une forte masse de fer doux, placée à son intérieur, sert à diminuer la réluctance magnétique. La forme des aimants fixes a été également modifiée pour permettre de placer le cadre; les deux aimants, en forme d'U, sont disposés bout à bout de manière à obtenir des pôles conséquents ; ils sont réunis par deux plaques de fer.

La durée d'oscillation est d'environ 8 à 10 secondes, ce qui permet d'employer cet instru-

ment pour les mesures d'inductance, même lorsque les bobines essayées contiennent du fer. La sensibilité de l'instrument est telle qu'un microcoulomb donne, à circuit ouvert, une élongation de 40 à 50 mm sur une échelle distante de 1 m et qu'un courant de 0,01 microampère produit une déviation de 1 mm.

La résistance d'amortissement critique est d'environ 4000 ohms, soit huit fois celle de la bobine mobile qui a 500 ohms de résistance.

Modèles E. Ducretet. — Dans les galvanomètres Deprez-d'Arsonval construits par M. E. Ducretet (*fig.* 23), le champ magnétique est très puissant; il est obtenu par une série de six aimants circulaires disposés horizontalement et auxquels sont fixés des pièces polaires. Le cadre mobile a une résistance de 350 ohms. La suspension de ce cadre galvanométrique est constituée par deux fils fins métalliques, fixés aux montures extrêmes S et T qui permettent de leur donner la tension convenable. Ces deux fils, passant par le centre de gravité du cadre mobile, forment un véritable axe fixe autour duquel le cadre peut prendre un mouvement de rotation; ils servent en même temps à amener le courant à la bobine.

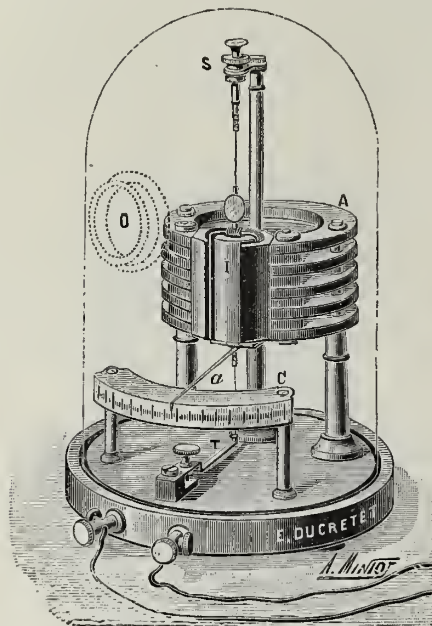


Fig 23. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle E. Ducretet.

La suspension du cadre est symétrique, c'est-à-dire que les fils de suspension, placés au-dessus et au-dessous, ont même longueur et même diamètre et, par suite, donnent des couples de torsion égaux.

A l'intérieur du cadre est une pièce de fer doux I, en forme de cylindre creux, destinée à augmenter le flux qui traverse la bobine mobile.

Les lectures se font soit à l'aide du miroir et d'une échelle, soit directement sur un cadran divisé C.

Ce galvanomètre est apériodique et très sensible. On obtient une déviation de 17,3 mm sur une échelle placée à 1 m avec un courant ayant une intensité de 1 microampère.

Pour certaines applications spéciales, telles que la pyrométrie industrielle, M. E. Ducretet a adapté un dispositif enregistreur au galvanomètre qui vient d'être décrit. Ce dispositif laisse à l'équipage du galvanomètre toute sa mobilité et sa légèreté et à l'instrument toute sa sensibilité.

La figure 24 montre l'ensemble de ce galvanomètre enregistreur. L'équipage mobile du galvanomètre porte une aiguille légère en aluminium qui se termine par un petit encrier *e*, servant de plume inscrivante; la pointe de cet encrier-plume est amenée facilement, à l'aide de vis de réglage, à une faible distance du papier quadrillé, fixé sur le cylindre enregistreur H. Ce cylindre enregistreur est commandé par un mouvement d'horlogerie effectuant un tour complet en 26 heures; la large bande de papier quadrillé qu'il reçoit est divisée en 24 heures, laissant ainsi une partie libre, qui est recouverte par la bande d'attache *a*. Cette feuille doit être enlevée tous les jours et remplacée par une autre. Comme dans tous les enregistreurs, les traits verticaux (génératrices du cylindre) donnent la valeur du temps en heures et fractions d'heure. Les traits horizontaux donnent la valeur de toutes les parties de la courbe inscrite en fonction du temps.

Le mouvement d'horlogerie commande une roue à rochet R et le nombre de dents de cette roue est tel que la came qui suit son mouvement fait une chute brusque, toutes les minutes environ. Le cadre P est solidaire de cette came; deux ressorts lui assurent une certaine flexibilité et des vis de réglage permettent d'amener les bords de ce cadre assez près de l'aiguille, mais sans y toucher. A chaque chute de la came, par suite du passage d'une dent à la suivante, la

vitesse acquise et la flexibilité du cadre amènent ce dernier au contact de l'aiguille pendant un instant et l'encre de la plume *e* laisse alors la trace de son contact momentané sur le papier qui est disposé sur le tambour H. L'aiguille indicatrice du galvanomètre reprend aussitôt la position exacte que lui donne la valeur de l'intensité du courant circulant dans la bobine mobile.

Le tracé intermittent ainsi obtenu donne une courbe exacte et la sensibilité du galvanomètre n'est nullement affectée.

Un shunt approprié, placé en dérivation dans le circuit du galvanomètre, permet de ramener l'amplitude des déviations dans les limites imposées par la largeur du papier quadrillé.

Dans les premiers modèles de ce type, le tambour enregistreur n'actionnait pas lui-même le cadre P par une came. Ce cadre était abaissé par l'attraction de l'armature d'un électro-

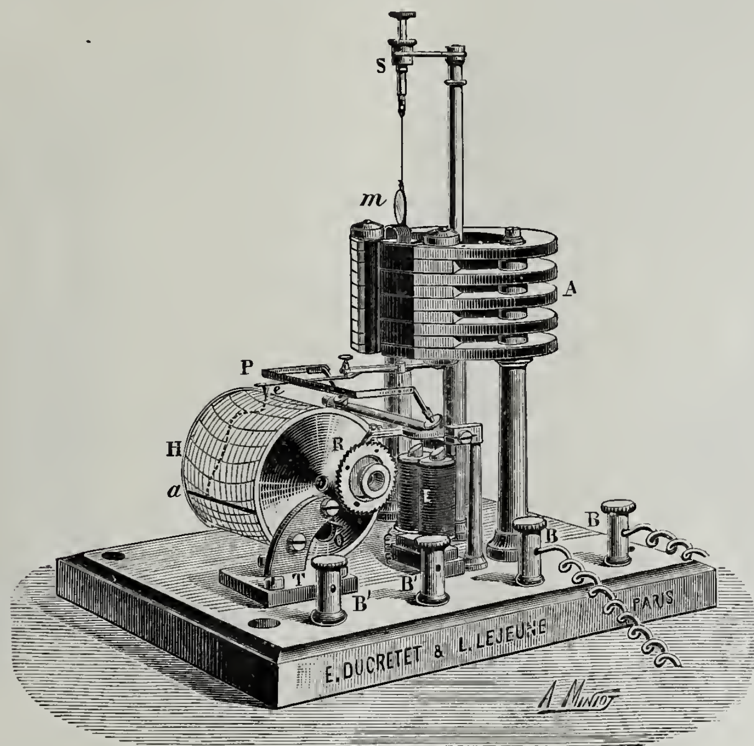



Fig. 24. — Galvanomètre enregistreur Ducretet.

aimant E dans lequel on envoyait un courant temporaire, chaque fois qu'on voulait produire une inscription. Le fonctionnement automatique et périodique de la came R dispense de cette sujétion.

Modèles Edelmann. — Le Dr Edelmann, de Munich, avait exposé plusieurs modèles de galvanomètres genre Deprez-d'Arsonval.

Le modèle de grande sensibilité, que montre la figure 25, comporte un aimant fixe, formé de plusieurs barreaux droits M, réunis par une série de tôles formant culasse, et supporté par une potence P. Entre les pôles de cet aimant est disposée une cage vitrée, à l'intérieur de laquelle se trouve la bobine mobile.

L'équipage mobile comprend un support KR (*fig.* 26), la bobine mobile *r*, un miroir *s*, un noyau de fer doux E et les fils de suspension *g*, *w*; le fil de suspension inférieur est souvent remplacé par un ressort en boudin afin de diminuer le couple antagoniste et d'augmenter, par suite, la sensibilité de l'instrument.

Les fils de suspension, inférieur et supérieur, peuvent être tendus séparément, à l'aide des vis *d* et T. Le courant entre par *a* et sort par *u*.

Ce galvanomètre est très sensible. Avec une bobine mobile ayant une résistance de 600 ohms, on obtient une déviation de 200 mm sur une échelle distante de 1 mètre pour une intensité de courant de 1 microampère.

Employé comme galvanomètre balistique, en supprimant l'amortisseur, on obtient une durée d'oscillation de 15 secondes pour une période complète, lorsque le fil de suspension inférieur est remplacé par un ressort en boudin.

Le modèle industriel, que représente la figure 27, affecte une forme différente. Il est un peu moins sensible que le précédent, mais il est de construction plus simple.

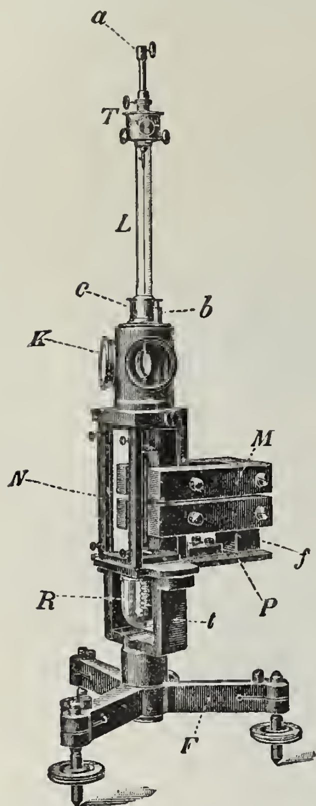



Fig. 25. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle Edelmann.

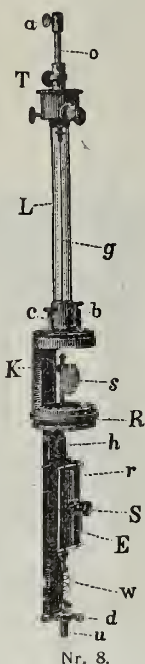



Fig. 26. — Équipage mobile du galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle Edelmann.

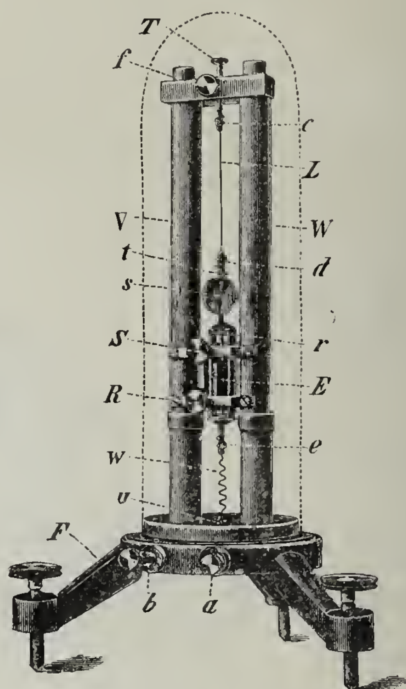



Fig. 27. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle industriel de M. Edelmann.

L'instrument est monté sur un socle en ardoise muni de vis calantes et de deux bornes *a* et *b*.

L'aimant fixe est constitué par deux barreaux aimantés V, W, disposés verticalement et réunis à leur partie supérieure par une culasse en fer *f*. Ces barreaux sont simplement en acier rond étiré, ce qui rend leur assemblage très économique. Vers la partie inférieure sont fixées les pièces polaires et le noyau de fer doux E. Dans le champ magnétique ainsi formé oscille la bobine mobile *r*, dont la suspension supérieure est constituée par un fil d'argent L, fixé en *c* et en *d*, et la suspension inférieure, par un ressort en boudin W, attaché en *e* et en *u*.

Une cloche en verre protège l'instrument. Quand la bobine est traversée par un courant d'une intensité de 1 microampère, on obtient une déviation de 150 mm sur une échelle placée à 1 m.

Modèles Hartmann et Braun. — Ces instruments (*fig.* 28) comportent un système formé de trois aimants fixes en fer à cheval, dont l'acier est pris dans des barres cylindriques. Les pôles de ces aimants pénètrent dans des logements pratiqués dans les pièces polaires, ce qui facilite la construction.

La bobine ou cadre mobile, suspendu par des fils fins en argent, a deux enroulements, dont l'un est utilisé pour les mesures et l'autre, shunté par des résistances convenables, sert à régler l'amortissement des oscillations. Ce second enroulement ne comporte qu'un petit nombre de spires et rend l'instrument apériodique, quelle que soit la résistance du circuit dont fait partie le premier.

Les cloches en verre qui protègent les galvanomètres Hartmann et Braun méritent une mention spéciale. Comme d'ordinaire, elles sont cylindriques et portent une fenêtre plane en verre fixée, au moyen d'une bonnette, à la hauteur du miroir.

Quand le plan de la fenêtre est vertical, il se produit sur l'échelle des réflexions multiples qui rendent les lectures assez incommodes, ces réflexions troublant l'obscurité relative dans laquelle les échelles translucides doivent se trouver.

La maison Hartmann et Braun évite très simplement cet inconvénient en inclinant un peu sur la verticale le plan du verre de la fenêtre. Les réflexions gênantes sont ainsi renvoyées hors de la direction de l'échelle.

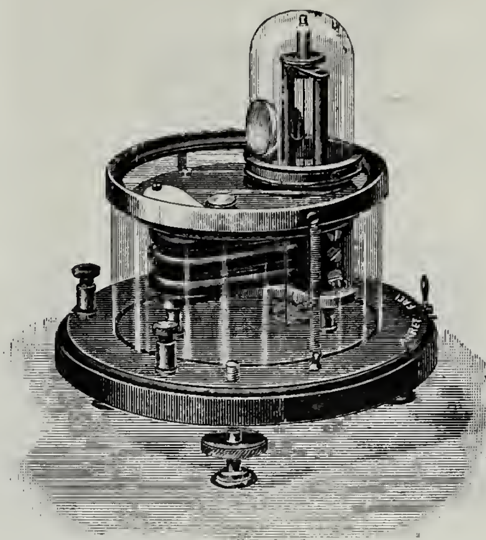


Fig. 28. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir, modèle Hartmann et Braun.

Le même modèle de galvanomètre se construit également avec aiguille indicatrice.

Modèle Siemens et Halske. — Dans ce modèle de galvanomètre (*fig.* 29), les aimants fixes, au nombre de six, ont la forme d'un fer à cheval et sont munis de pièces polaires disposées de manière à rendre le champ magnétique uniforme dans l'entrefer ménagé entre elles et le cylindre de fer doux placé à l'intérieur de la bobine mobile.

Le cadre ou bobine mobile est suspendu par un fil d'argent logé à l'intérieur du tube vertical qui surmonte les aimants. Un ressort en boudin maintient la partie inférieure du cadre.

Tout cet ensemble est placé dans une chape qui supporte le tube supérieur et le cylindre de fer doux ; cette chape porte également la boîte qui protège le miroir et qui se glisse dans un logement ménagé dans les aimants. Un prisonnier empêche le déplacement de toute cette partie amovible. Grâce à cette disposition, il est facile de substituer un cadre à un autre pour obtenir la sensibilité voulue.

Ce galvanomètre est muni d'un shunt magnétique permettant de faire varier sa sensibilité de 40 0/0 environ. Il est constitué par une pièce de fer que l'on peut rapprocher ou éloigner des pôles des aimants en manœuvrant la vis que porte un étrier placé à la hauteur de ces pôles.

Avec le cadre mobile le plus sensible, on obtient une déviation de 1 mm sur une échelle distante de 1 mètre avec un courant ayant une intensité de $8{,}5 \cdot 10^{-10}$ ampère.

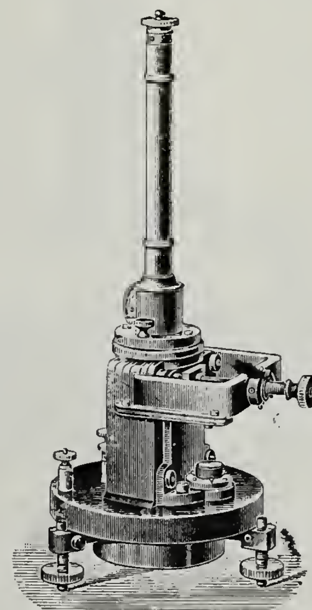


Fig. 29. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval, modèle Siemens et Halske.

Modèle bifilaire Crompton et Cie. — MM. Crompton et Cie, de Londres, exposaient un galvanomètre à miroir d'une très grande sensibilité, pouvant être utilisé pour les mesures par la méthode de réduction à zéro et aussi comme galvanomètre balistique.

Les aimants, en forme d'anneau, sont placés à plat et superposés au nombre de quatre (*fig.* 30); les pôles sont amincis afin de concentrer le flux dans un espace aussi réduit que possible. La colonne centrale de l'instrument sert de support pour l'équipage mobile et aussi pour un disque de fer doux placé entre les pôles.

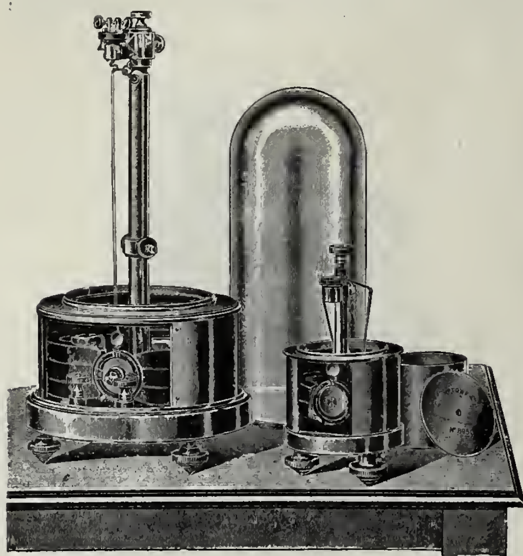


Fig. 30. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval bifilaire, modèle Crompton.

La bobine mobile a la forme d'un anneau et les extrémités de l'enroulement sont soudées à deux crochets qui servent à la suspendre. Cette suspension bifilaire rend l'instrument très sensible et sert en même temps à amener le courant à la bobine.

La longueur du bifilaire peut être modifiée au moyen d'un chevalet qui coulisse sur la colonne centrale. L'écart des fils de suspension peut également être modifié en manœuvrant le treuil sur lequel ils sont attachés.

Pour que l'instrument fonctionne régulièrement, il est nécessaire de le placer bien verticalement afin que la bobine mobile ne vienne pas toucher les pôles de l'aimant fixe.

Modèles Chauvin et Arnoux. — MM. Chauvin et Arnoux avaient exposé deux modèles de galvanomètres Deprez-d'Arsonval.

Le premier (*fig.* 31) a un équipage mobile suspendu à un ressort en boudin très flexible, ce qui permet de transporter l'instrument sans risquer de briser la suspension. L'enroulement, en fil de cuivre ou de maillechort, est, suivant le cas, à grande ou à faible résistance.

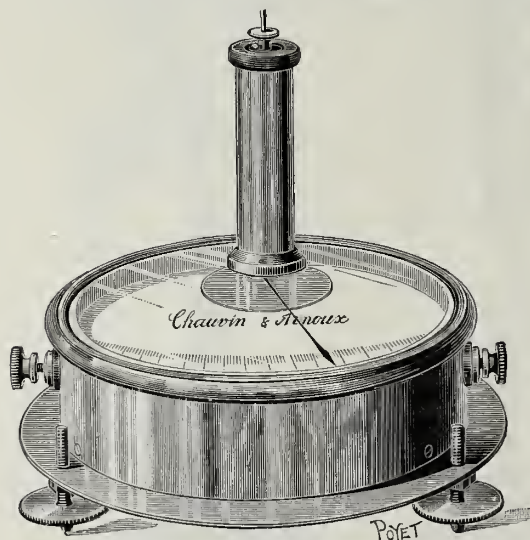



Fig. 31. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval à suspension élastique Chauvin et Arnoux.

L'équipage mobile est muni d'une aiguille qui se déplace sur un cadran, qui peut être gradué soit en millivolts, soit en milliampères, le zéro de la graduation pouvant être placé soit à une extrémité de l'échelle, soit au milieu, lorsque l'instrument doit être utilisé pour des mesures comportant la méthode de réduction à zéro.

Le socle est muni de trois vis calantes qui permettent, avec l'aide de la tête de torsion et du bouton de réglage en hauteur, de bien déterminer la position du cadre dans le champ pour que l'aiguille oscille librement.

Le second modèle (*fig.* 32) est un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir de dimensions très réduites et, par conséquent, facile à transporter, même dans une poche de vêtement.

Le foyer du miroir permet d'effectuer les lectures sur une règle transparente ordinaire placée à 1 mètre, si on préfère son emploi à celui de la règle livrée avec l'instrument et qui est généralement placée à 33 cm, sur un support démontable en trois pièces, auquel est suspendu également le galvanomètre par un joint à la Cardan.

A la distance de 33 cm, on obtient une déviation d'une division pour 0,1 microampère, la résistance de la bobine mobile étant d'environ 100 ohms.

On peut utiliser avec ce galvanomètre le réducteur universel que l'on voit sur la figure 32 et que l'on peut étalonner de manière à obtenir exactement 0,000 000 1 ampère par division, des prises de courant permettant de faire varier la sensibilité dans les rapports $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{10}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{1000}$ et $\frac{1}{10000}$.

MM. Chauvin et Arnoux ont également construit une résistance de 1 mégohm, fractionnée

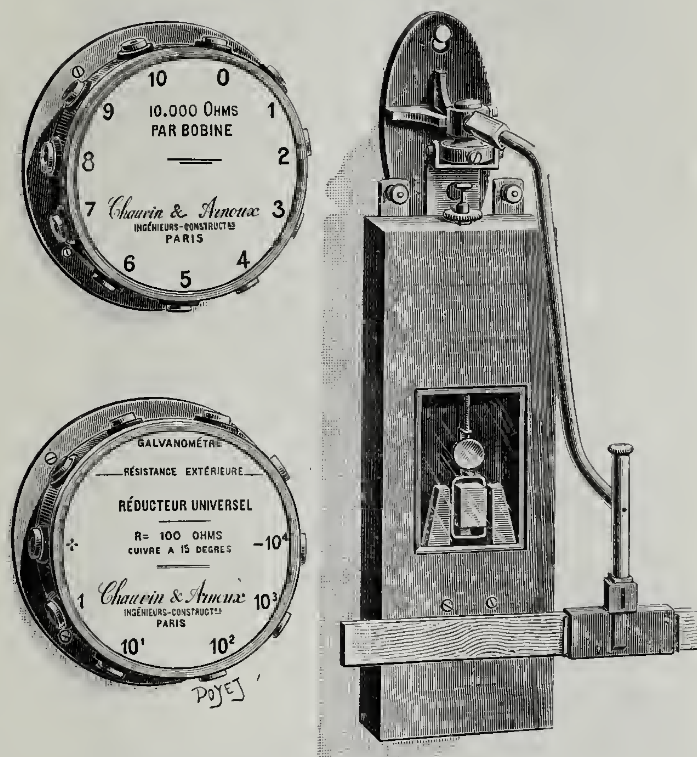



Fig. 32. — Galvanomètre Deprez-d'Arsonval à miroir, modèle transportable, Chauvin et Arnoux.

en 10 bobines de 100 000 ohms, que l'on peut employer avec ce galvanomètre pour effectuer des mesures de résistance d'isolement.

**Galvanomètre enregistreur à relais Callendar.** — Cet instrument (*fig.* 33), exposé par la *Cambridge Scientific Instrument C°*, de Cambridge (Angleterre), enregistre graphiquement les variations des diverses quantités physiques qui peuvent se déduire d'une mesure de résistance ou d'une détermination de différence de potentiel. C'est ainsi qu'il est possible de l'utiliser pour tracer la courbe des variations de consommation d'énergie électrique d'un réseau de distribution.

La figure 34 montre schématiquement la disposition des communications.

Sur une planchette verticale se trouve un pont de Wheatstone, placé à la partie inférieure et comprenant les bornes + et — de la pile, les bornes C et P où s'attachent les extrémités du circuit dont on veut mesurer les variations de résistance, la clé de pile B et la clé M du circuit des relais (*fig.* 33).

La résistance variable du pont est constituée par un fil calibré le long duquel se déplace

un curseur D (*fig.* 34), mû par un chariot spécial qui porte, en outre, la plume inscrivant les courbes sur un grand tambour horizontal actionné par un mouvement d'horlogerie.

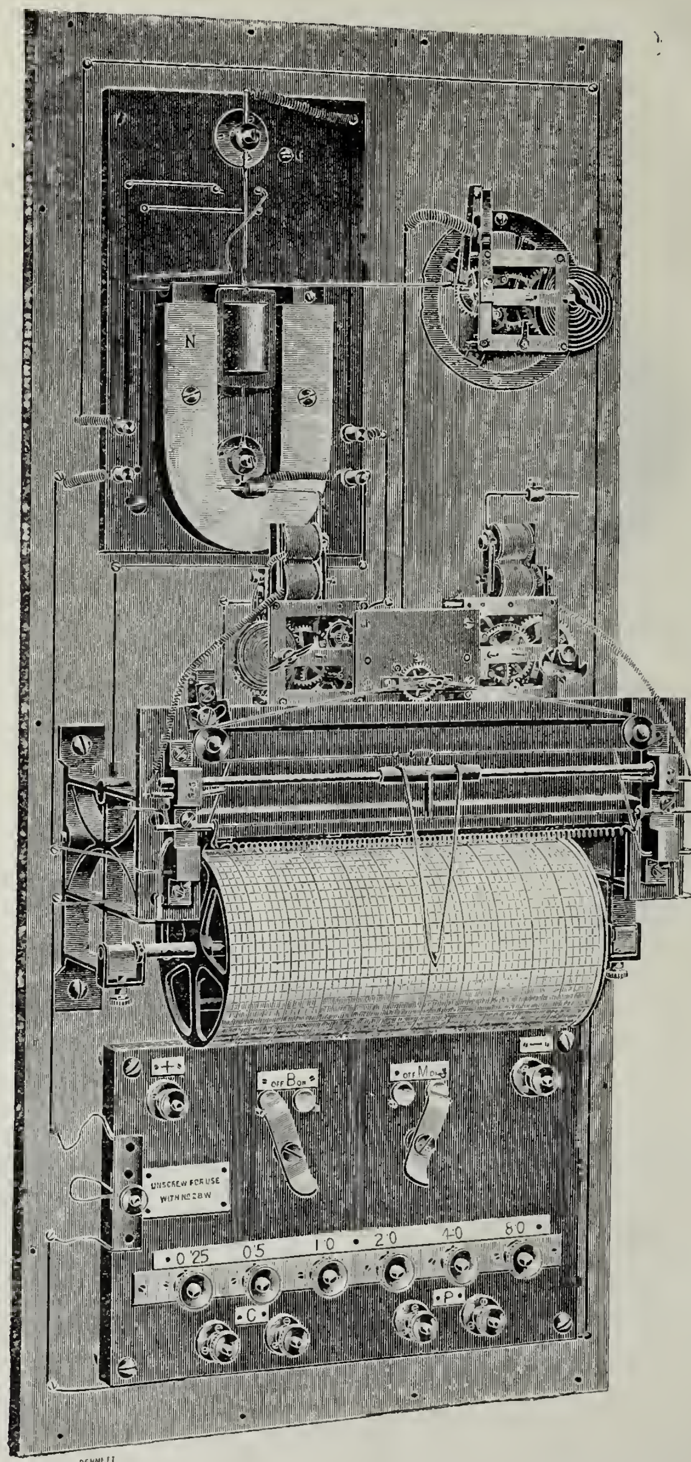



Fig. 33. — Galvanomètre enregistreur à relais du professeur Callendar.

Le galvanomètre, placé à la partie supérieure, est du type Deprez-d'Arsonval à cadre mobile ; il sert de galvanoscope, les mesures s'effectuant par la méthode de réduction à zéro.

Le galvanomètre a pour fonction de déplacer la plume soit vers la droite, soit vers la gauche, suivant le sens de la déviation. La plume s'arrête dès que l'aiguille du galvanomètre cesse d'être déviée.

Le mécanisme de déplacement du chariot, actionné par le galvanomètre, se compose d'un mouvement d'horlogerie analogue à celui des réveille-matin et, par conséquent, d'un prix peu élevé. L'échappement de ce mouvement d'horlogerie est commandé par les armatures d'électro-aimants formant relais et de telle façon que le rouage défile quand l'armature est attirée et s'arrête dès que le courant cesse d'actionner les électro-aimants. Les circuits de ces électro-aimants sont fermés par l'aiguille du galvanomètre.

Ce mouvement d'horlogerie actionne une des roues d'un engrenage différentiel dont le planétaire, ou roue satellite, tourne dans un sens ou dans l'autre suivant que c'est l'un ou l'autre des rouages qui défile. L'axe de la roue satellite porte un pignon qui conduit une roue dentée, dont l'axe porte une poupée formant treuil. Sur ce treuil s'enroule une cordelette qui, passant sur deux galets de renvoi, produit le déplacement du chariot porte-plume et du curseur mobile le long du fil calibré.

Lorsque le relais de gauche attire son armature, le treuil tourne dans un sens et la plume se déplace vers la gauche ; si, au contraire, le relais de droite est actionné, la plume et le curseur vont vers la droite. Enfin, lorsque les relais sont au repos, le chariot s'arrête.

Si, pour une raison quelconque, le chariot tend à dépasser la limite de sa course, le circuit du relais correspondant est coupé automatiquement. La sensibilité des relais se règle par le déplacement convenable de petits contrepoids visibles sur la figure 33.

Ce sont les déviations du cadre mobile du galvanomètre qui actionnent l'un ou l'autre des relais au moyen du dispositif suivant.

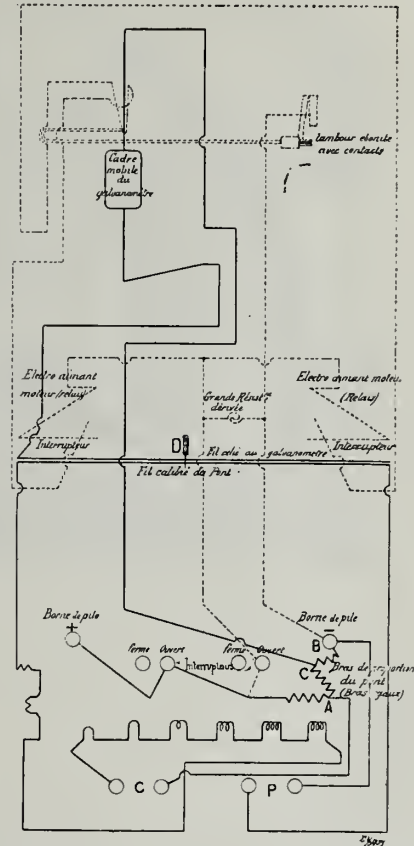



Fig. 34. — Schéma des connexions du galvanomètre Callendar.

Le cadre galvanométrique est muni d'une aiguille le long de laquelle sont fixés deux fils isolés, reliés aux relais par l'intermédiaire de fils très souples et se terminant à l'extrémité de l'aiguille par deux contacts en platine.

Lorsque le galvanomètre ne dévie pas, les pointes en platine sont également écartées d'un tambour en ébonite dont les joues sont garnies de platine. Dans ces conditions, lorsque le galvanomètre dévie dans un sens ou dans l'autre, l'une des pointes vient en contact avec la partie métallique du tambour, fermant ainsi le circuit du relais correspondant.

Afin d'obtenir un contact suffisant, malgré la faiblesse de la pression résultant de faibles déviations, M. Callendar a employé l'artifice suivant : Le tambour à contacts tourne constamment sous l'action d'une mouvement d'horlogerie spécial que représente la figure 35. Un ressort à lames, formant pincettes, frotte sur les parties métalliques du tambour en ébonite et, par suite de cette rotation, entretient les surfaces métalliques dans un grand état de propreté. Pour éviter que les extra-courants de rupture, qui produisent des étincelles toutes les fois que l'aiguille du galvanomètre cesse de toucher les joues du tambour, n'altèrent les surfaces de contact, la rupture du circuit n'est pas complète et celui-ci reste fermé à travers une résistance sans self-induction qui empêche la production d'étincelles. Les relais doivent naturel-

lement être réglés de manière que leurs armatures ne soient pas attirées lorsque le courant traverse cette résistance.

Grâce à cette série de dispositions ingénieuses, les relais fonctionnent pour la plus légère déviation du galvanomètre. Le chariot et la plume s'éloignent d'autant plus du centre du tambour enregistreur que l'équilibre du pont est plus détruit.

Sur la figure 34, qui donne les connexions de cet instrument, les circuits du pont sont indiqués en traits pleins et ceux des relais en pointillé. La même pile sert en même temps pour le pont et pour faire fonctionner les relais.

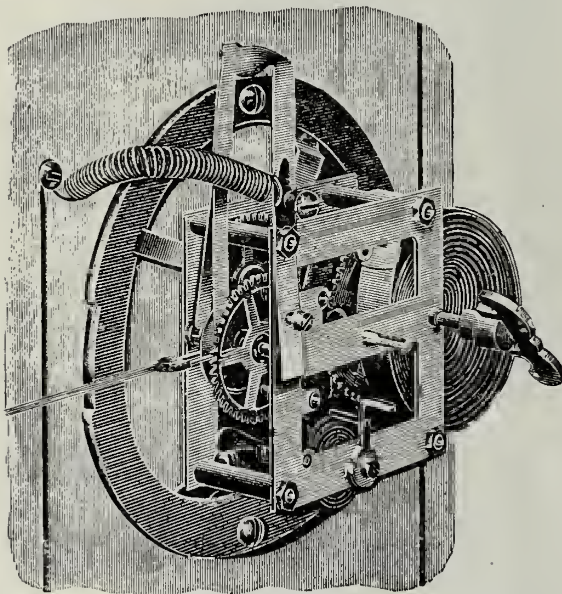


Fig. 35. — Mouvement d'horlogerie du tambour à contacts du galvanomètre enregistreur Callendar.

Les bras de proportion du pont sont égaux. Les points C et D sont reliés au galvanomètre et le courant de la pile arrive en A et B, lorsqu'on ferme l'interrupteur placé en B. L'interrupteur M commande les relais. La résistance dont on veut mesurer les variations est reliée aux bornes P; suivant sa valeur, on intercale une résistance convenable entre les bornes C afin d'équilibrer le pont et de maintenir le galvanomètre au zéro. Si l'emploi des résistances marquées 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 4 et 8 suffit, on met les bornes C en court-circuit.

Un rhéostat, placé entre le point A du pont et la borne +, sert à limiter l'intensité du courant de la pile.

Sur la figure 33, la grande résistance sans self-induction, dérivée sur les relais, est représentée par un long boudin placé au-dessus du tambour de l'enregistreur. Ce dernier peut faire un tour en une heure ou en douze heures, suivant que l'on immobilise l'arbre du côté gauche ou celui du côté droit par le serrage de boutons molettés placés sous les chapes qui le supportent, cet arbre étant en deux parties indépendantes.

Le galvanomètre Callendar a été déjà utilisé pour enregistrer la courbe des variations de température d'un four à acier, dans lequel était disposé un pyromètre à fil de platine, dont la résistance variait suivant la température à laquelle il était soumis.

## GALVANOMÈTRE THERMIQUE

**Galvanomètre à miroir Hartmann et Braun.** — Cet instrument (*fig.* 36) est le seul de ce genre qui ait figuré à l'Exposition.

Comme on le voit sur la figure schématique 37, ce galvanomètre comporte deux fils dilatables AB, CD, parallèles et tendus verticalement. Le courant traverse ces fils, reliés en série ou en parallèle suivant les cas, et la dilatation produite par l'échauffement dû au passage du courant se traduit par le rapprochement des points $a$ et $b$, réunis par un fil de soie très fin $acb$. La flèche en $c$ est plus grande qu'en $a$ et qu'en $b$ ; l'amplification est encore augmentée par le dispositif suivant : en $c$ s'attache un nouveau fil fin qui se fixe, par l'extrémité opposée, dans la jante d'une petite poulie $h$, susceptible de tourner autour de son axe ; un petit ressort $r$ tend à faire tourner le miroir $m$, solidaire de la poulie $h$, en maintenant tendus le système de fils $cd$, $ab$ et les fils dilatables AB et CD. Lorsque ces derniers s'allongent, le ressort $r$ entraîne le miroir et, comme la dilatation est considérablement amplifiée, l'instrument est très sensible.

Comme on le voit sur la figure 38, le miroir *m* est fixé sur une tige verticale qui porte, indépendamment de la poulie *h*, un disque *e* en aluminium qui tourne en même temps que le miroir dont il est solidaire. Les bords de ce disque passent entre les branches de l'aimant E et l'on obtient ainsi un amortissement convenable.

Le ressort agissant sur le miroir est, en réalité, remplacé par les fils de suspension *gg'* et *hh'*, qui reçoivent une torsion initiale lorsqu'on fait tourner le bouton F que la vis de pression V permet de maintenir dans la position donnée.

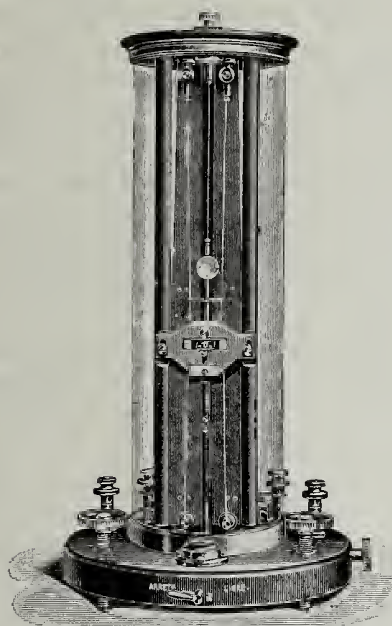


Fig. 36. — Galvanomètre thermique Hartmann et Braun.

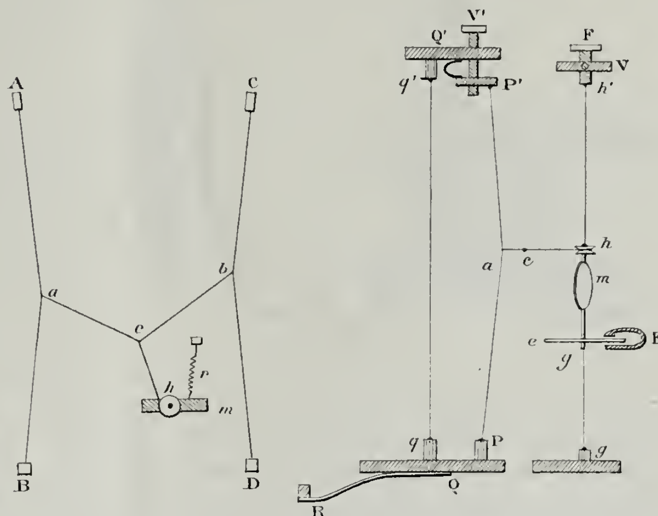



Fig. 37 et 38. — Disposition schématique du galvanomètre thermique Hartmann et Braun.

Chacun des fils dilatables s'attache, d'une part, à un plot P et, d'autre part, à une pièce P' qui sert à donner au fil dilatable une tension convenable par la manœuvre de la vis V'. Les platines Q et Q' sont réunies par un fil *qq'*, identique aux fils dilatables, mais qui n'est pas traversé par le courant. Ce fil sert à compenser l'action des variations de température sur le système des fils actifs. A cet effet, un ressort R maintient toujours tendu le fil *qq'*, de telle sorte que la dilatation observée pour les fils traversés par le courant est égale à la différence des dilatations de ces fils et du fil compensateur *qq'*.

Le métal employé pour constituer les fils dilatables doit avoir une grande résistivité, pratiquement indépendante des variations de température. On peut, par exemple, utiliser des fils de constantan.

## GALVANOMÈTRE ÉLECTRO-CAPILLAIRE

**Galvanomètre Lippmann.** — Cet instrument (*fig.* 39), improprement appelé électromètre, est un véritable galvanomètre basé sur les variations qu'éprouve la constante capillaire du mercure en présence de l'eau acidulée sulfurique, lorsqu'il existe une différence de potentiel entre les deux liquides.

L'instrument se compose d'un tube de verre vertical A de 70 cm environ de hauteur, se terminant dans le bas par une partie très effilée. Ce tube contient du mercure jusqu'à une hauteur telle que la capillarité équilibre le poids de la colonne de mercure qui, dans ces conditions, se maintient un peu au-dessus de l'extrémité capillaire, prêt à s'écouler. La pointe plonge dans

de l'acide sulfurique étendu, qui est contenu dans le vase B, au fond duquel se trouve une couche de mercure.

Deux fils de platine α et β, soudés respectivement dans le tube A et dans le vase B, permettent de les relier aux deux points dont on veut mesurer la différence de potentiel. Le pôle négatif doit être en communication avec le tube A et le pôle positif avec le vase B. La polarisation, due au passage du courant dans le sens BA, a pour effet d'augmenter la valeur de la constante capillaire et le mercure remonte alors dans la partie effilée du tube A. Les déplacements du ménisque s'observent à l'aide d'une loupe M.

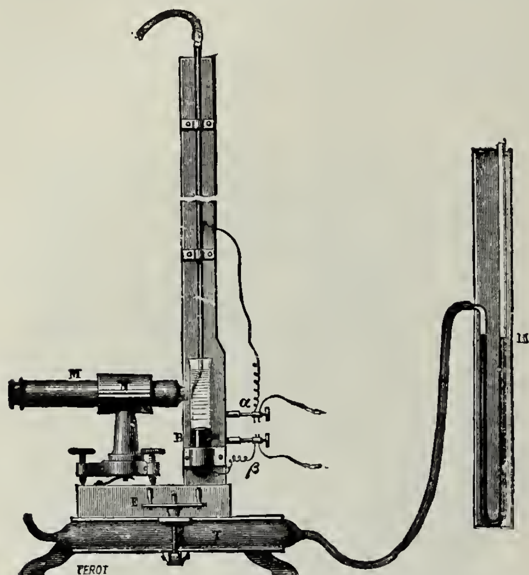


Fig. 39. — Galvanomètre électro-capillaire Lippmann.

Pour amener l'instrument au zéro, lorsqu'on veut faire une mesure, il faut d'abord égaliser les potentiels de A et de B, ce qui s'obtient par la mise en court-circuit des bornes α β.

Cet instrument peut être utilisé, comme indicateur, avec les méthodes de réduction à zéro, soit pour fournir des indications directes. Dans ce dernier cas, on prend, comme point de départ, la position occupée par le ménisque, après que les bornes α et β ont été mises en court-circuit. On relie alors à ces bornes les points dont on veut mesurer la différence de potentiel, différence qui ne doit pas dépasser 0,8 volt, et l'on ramène ensuite le ménisque à sa position initiale en exerçant une pression sur le haut de la colonne mercurielle. A cet effet on comprime, à l'aide de la vis E, la poire en caoutchouc T; un manomètre H fait connaître la valeur de cette pression, valeur de laquelle on déduit la différence de potentiel, exprimée en fractions de volt, à l'aide d'une courbe de graduation établie empiriquement. Au repos, les bornes de ce galvanomètre doivent toujours être reliées en court-circuit.

Ce galvanomètre est construit et exposé par la maison Breguet.

II

# ÉLECTRODYNAMOMÈTRES

## ÉLECTRODYNAMOMÈTRES DE TORSION

**Électrodynamomètres Siemens et Halske.** — La Société Siemens et Halske, de Berlin, avait exposé plusieurs modèles d'électrodynamomètres de torsion.

Le modèle le plus connu (*fig.* 40) comporte un circuit fixe *abcd* (*fig.* 41) et un circuit mobile ABCD, replié en forme de rectangle et suspendu à un ressort *r*. Les extrémités du

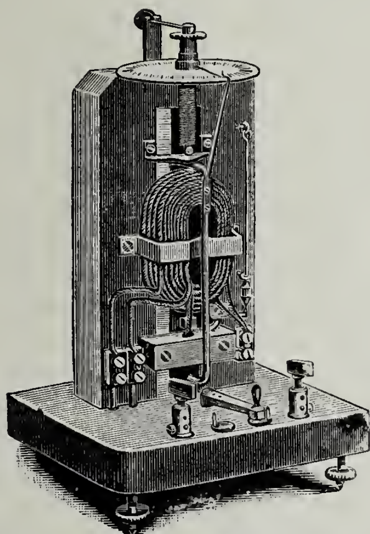


Fig. 40. — Électrodynamomètre de torsion Siemens et Halske.

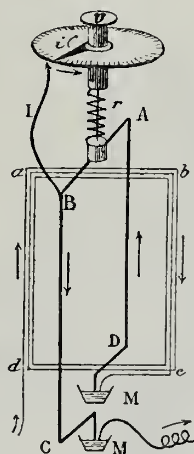



Fig. 41. — Schéma des connexions de l'électrodynamomètre Siemens et Halske.

circuit mobile plongent dans des godets M, M, remplis de mercure, qui servent à établir les communications nécessaires.

A l'état de repos, le plan du circuit mobile est perpendiculaire à celui du circuit fixe et un index I, fixé sur le circuit mobile, se trouve en regard du zéro de la graduation établie sur un cadran horizontal placé à la partie supérieure de l'instrument.

Lorsqu'un courant traverse l'électrodynamomètre en entrant par une des extrémités du circuit fixe et parcourant ensuite le circuit mobile, les parties *ad* et AD s'attirent, tandis que les parties *ad* et BC se repoussent ; dans ces conditions, le circuit mobile est dévié de sa position d'équilibre, le ressort *r* se tord et l'index I se déplace dans le sens indiqué par la flèche.

La douille *v*, qui porte le ressort *r*, est également munie d'un index *i* qui, au repos, se trouve en regard du zéro du cadran gradué. Lorsque l'index I a été déplacé par suite de la déviation du circuit mobile sous l'action du passage d'un courant, on fait tourner à la

main la douille $v$ dans le sens indiqué par la flèche, afin de tordre le ressort en sens inverse et cela jusqu'à ce que l'index I revienne au zéro. L'index I indique alors sur le cadran gradué la valeur

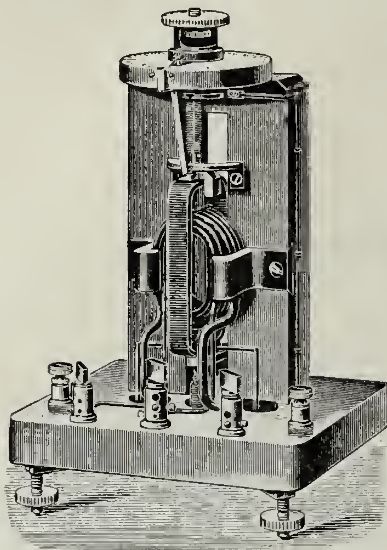


Fig. 42. — Electrodynamomètre Siemens et Halske.

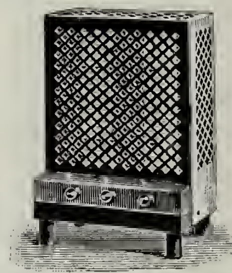


Fig. 43. — Résistance additionnelle pour électrodynamomètre Siemens et Halske.

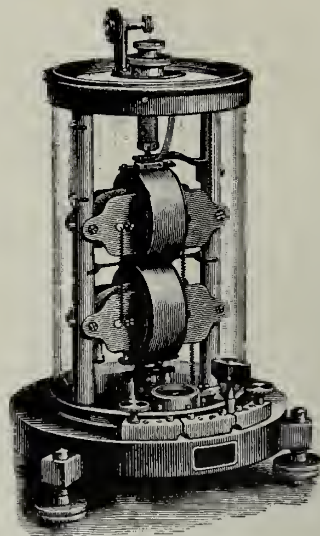


Fig. 44. — Electrodynamomètre astatique Siemens et Halske.

de l'angle de torsion du ressort $r$, et l'on en déduit l'intensité du courant à l'aide d'une table, fournie avec chaque instrument, table qui donne la valeur en ampères de l'intensité du courant correspondant aux diverses divisions de la graduation, lorsque l'index I a été ramené au zéro.

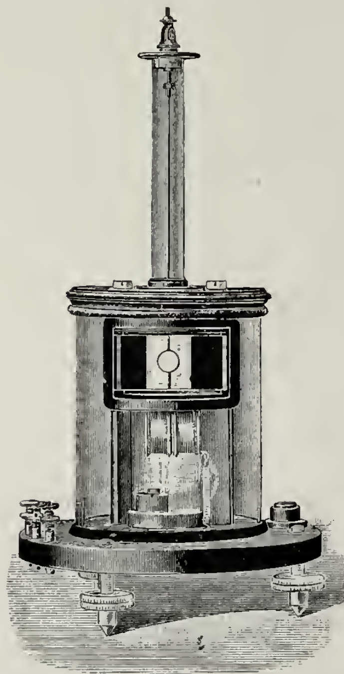


Fig. 45. — Électrodynamomètre à miroir Siemens et Halske.

Généralement, le circuit fixe comporte deux bobines dont le nombre de spires et la section du fil sont différents. On peut ainsi utiliser l'instrument pour la mesure d'intensités très diverses. Le circuit mobile est suspendu à un fil de soie sans torsion, afin que le ressort $r$ ne subisse que des torsions et n'ait pas à supporter le poids du circuit mobile.

Un autre modèle d'électrodynamomètre de torsion est représenté (*fig.* 42). Il a été construit pour mesurer les intensités de courants continus, alternatifs et polyphasés, depuis 0 jusqu'à 50 ampères et depuis 0 jusqu'à 100 ampères.

En adjoignant à l'instrument une résistance additionnelle exempte d'induction et que l'on peut fractionner (*fig.* 43), on peut utiliser cet électrodynamomètre pour mesurer des différences de potentiel allant jusqu'à 200 volts.

La Société Siemens et Halske a exposé également un autre type d'électrodynamomètre (*fig.* 44), destiné surtout à être employé comme voltmètre pour tensions continues ou alternatives de formes de courbe quelconques. Il comporte deux bobines fixes et deux bobines mobiles constituant un système relativement astatique par rapport à des champs magnétiques assez éloignés.

Suivant les tensions à mesurer, on intercale dans le circuit des résistances non inductives qu'un commutateur à cheville permet d'insérer facilement. Il se construit trois modèles de ce instrument : l'un permet de mesurer les tensions comprises entre 15 et 90 volts, l'autre de 30 à 190 et le troisième de 120 à 720.

La même Société a encore exposé un modèle d'électrodynamomètre à miroir que représente la figure 45. Cet instrument ne peut servir qu'à mesurer de faibles intensités du courant. Il comporte deux bobines fixes et une bobine mobile sphérique attachée au fil de suspension qui porte également le miroir.

Il n'entre aucune pièce métallique dans cet instrument; les carcasses des bobines et toutes les pièces, à l'exception des bornes, sont en matière isolante. Les oscillations sont atténuées par un amortisseur à air.

**Électrodynamomètre Ganz.** — Cet instrument, construit et exposé par la maison Ganz de Budapest, est de construction analogue à celle de l'électrodynamomètre Siemens. Il permet de mesurer l'intensité des courants continus et des courants alternatifs de toute fréquence jusqu'à 50 et jusqu'à 200 ampères.

Le courant traverse les bobines fixes et le circuit mobile montés en série et il développe un couple proportionnel au carré de son intensité. Le couple résistant étant proportionnel à la torsion du ressort, l'intensité mesurée est égale à $C\sqrt{\theta}$, C étant une constante variable d'un instrument à l'autre avec le ressort utilisé et $\theta$ étant l'angle de torsion.

Un système de commutateur à fiches permet de retirer l'instrument du circuit ou de changer de bobine fixe sans interrompre le courant.

**Électrodynamomètre J. Carpentier.** — L'électrodynamomètre J. Carpentier (*fig.* 46) est basé sur le même principe que celui de Siemens, mais il en diffère par quelques détails de construction.

Le ressort à boudin et le fil de suspension en soie sont remplacés par un fil métallique de torsion qui sert en même temps de conducteur pour amener le courant à la bobine mobile.

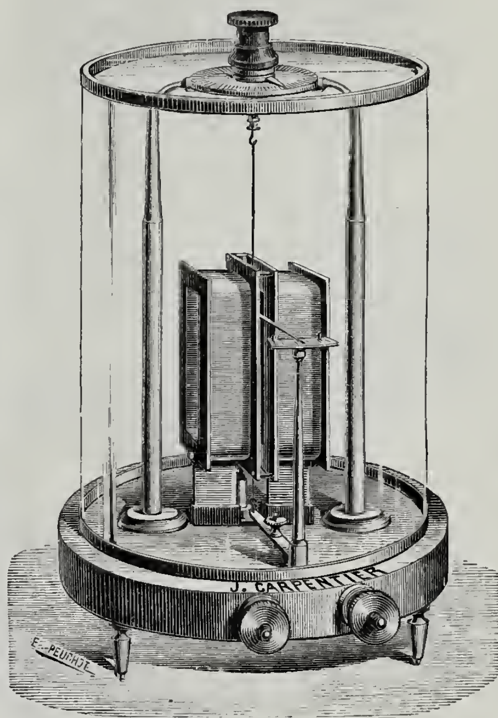


Fig. 46. — Électrodynamomètre Carpentier.

Cet instrument, destiné à mesurer des courants d'assez grande intensité, a deux bobines fixes, formées d'un ruban de cuivre très épais et faisant un certain nombre de tours. La bobine mobile, placée à l'intérieur des bobines fixes, a son plan perpendiculaire à celui de ces dernières, auxquelles elle est reliée en dérivation ; elle est munie d'une aiguille d'aluminium dont la course est limitée par deux butées. Lorsqu'un courant traverse l'instrument, l'aiguille est déviée et, pour obtenir l'équilibre, on tourne le bouton supérieur jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice soit ramenée à un point de repère placé entre les deux butées. Le bouton porte un index qui permet de lire l'angle de torsion sur un cadran. Une table, fournie avec l'instrument, fait connaître le nombre d'ampères correspondant aux divisions lues sur le cadran.

**Électrodynamomètre Hartmann et Braun.** — Cet instrument (*fig.* 47) diffère sensiblement des électrodynamomètres qui viennent d'être décrits. Il se compose d'une bobine fixe, sorte de solénoïde plat dont l'axe est incliné sur la verticale, et de deux bobines mobiles fixées aux extrémités d'un bras horizontal et reliées en dérivation avec la bobine fixe. Cet équipage mobile est suspendu à l'aide d'un ressort en métal non magnétique et d'un fil métallique qui servent en même temps de conducteur au courant; l'ensemble des deux bobines et du bras qui les porte peut tourner autour d'un axe vertical passant par le centre de gravité.

Une ailette en aluminium, fixée à la partie inférieure de l'axe et enfermée dans une boîte cylindrique, assure l'amortissement.

Les bobines de l'équipage mobile sont reliées entre elles de manière à constituer un système astatique et à se rapprocher de la bobine fixe lorsqu'elles sont traversées par le courant. Grâce à cette disposition, on peut obtenir une échelle assez proportionnelle; en faisant varier les positions relatives des bobines, on peut aussi obtenir une échelle quelconque.

Cet instrument est à lecture directe.

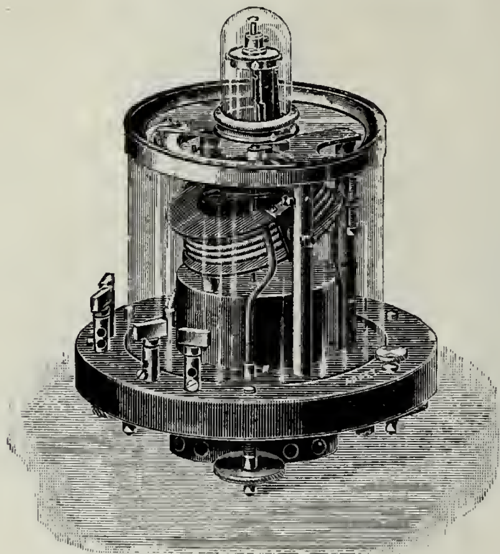


Fig. 47. — Électrodynamomètre Hartmann et Braun.

### ÉLECTRODYNAMOMÈTRES-BALANCES

**Ampère-étalon Pellat.** — Cet instrument est constitué par une bobine fixe à axe horizontal au centre de laquelle est placée une bobine à axe vertical montée sur le fléau d'une balance sensible au dixième de milligramme (*fig.* 48).

Les deux bobines sont montées en tension et traversées par le même courant. On amène le fléau au zéro en mettant un poids convenable dans le plateau et en fixant le zéro à l'aide d'un microscope monté sur le socle de l'instrument.

Celui-ci ne comporte naturellement aucune pièce en métal magnétique; les couteaux du fléau de la balance et les plans sur lesquels ils reposent sont en agate. Le cuivre du fléau est du métal pur exempt de fer.

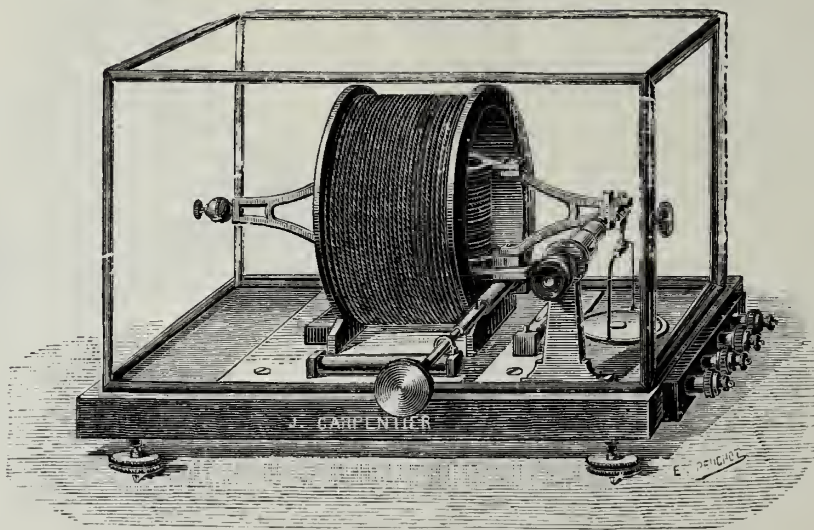



Fig. 48. — Ampère-étalon Pellat.

Avec cet instrument, on peut mesurer des intensités dont la valeur est comprise entre 0,2 et 0,5 ampère.

L'intensité cherchée est donnée par la formule suivante : $I = C\sqrt{gM}$, en unités *C. G. S.* (1 unité *C. G. S.* d'intensité = 10 ampères).

Pour éliminer l'action du champ magnétique terrestre, on inverse le sens du courant *dans la bobine fixe seule* et, pour que le fléau s'incline dans le même sens dans les deux cas, on met

un poids de 5 grammes dans le plateau avant de régler le contrepoids. On diminue ou on augmente ensuite ce poids, suivant le sens du courant, de façon à ramener toujours l'équilibre.

Dans cette formule, C est la constante d'étalonnage, $M$ est la masse des poids mis dans le plateau et exprimée en grammes, et $g$ l'accélération due à la pesanteur.

Avec l'ampère-étalon Pellat, un courant de 0,3 ampère est équilibré par un poids de 1,5 gramme environ. On apprécie donc la valeur de l'intensité à $\frac{1}{10000}$.

L'ampère-étalon Pellat est construit et exposé par M. J. Carpentier.

**Electrodynamomètres-balances lord Kelvin.** — Ces instruments sont construits et exposés par M. James White, de Glasgow.

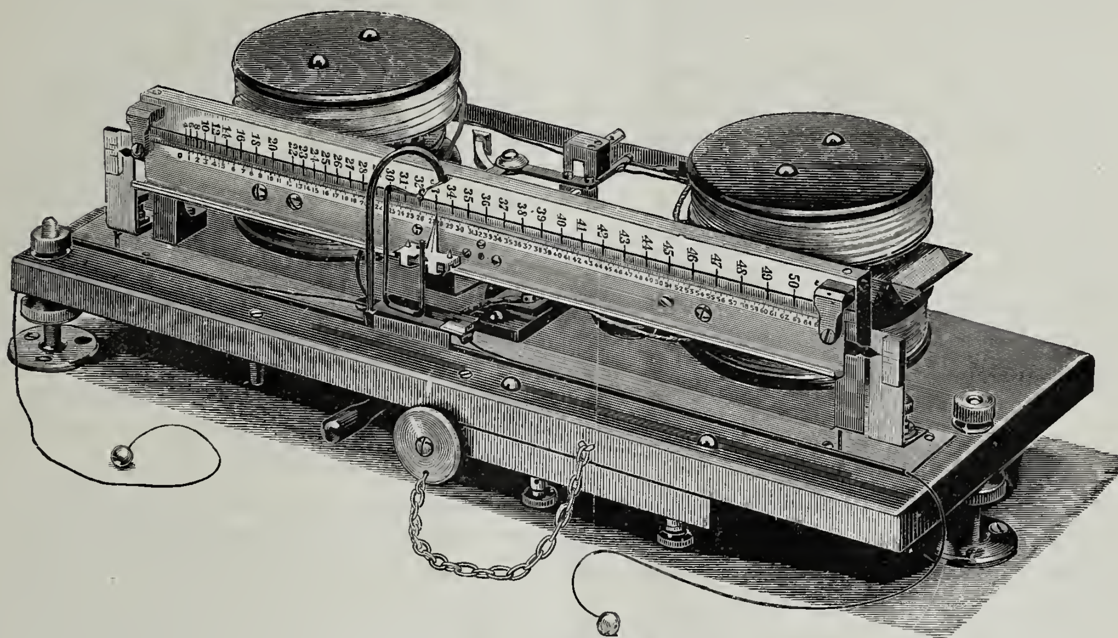


Fig. 49. — Balance centiampère.

Dans ces électrodynamomètres, le courant circule dans un ensemble de bobines, fixes et mobiles, et y développe des flux dont les actions réciproques produisent un couple électrodynamique que l'on équilibre par le poids de masses étalonnées; en d'autres termes, l'effort électrodynamique est mesuré par l'action de la pesanteur sur une masse donnée.

L'électrodynamomètre-balance (*fig.* 49) se compose essentiellement de deux paires de bobines fixes, horizontales et parallèles, FF, FF (*fig.* 50), entre lesquelles peuvent osciller deux bobines mobiles M, M, fixées horizontalement à chacune des extrémités d'un fléau de balance oscillant autour de son axe.

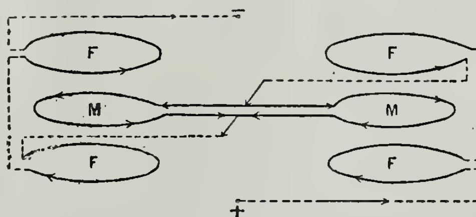



Fig. 50. — Schéma des bobines de l'électrodynamomètre-balance.

Le courant, dont le sens est indiqué par des flèches sur la figure 50, traverse en sens contraire les deux bobines fixes de droite, puis se partage en deux parties égales entre les bobines mobiles M, M, pour circuler finalement dans les bobines fixes de gauche. Le sens du courant est inversé dans chacune des bobines M, M, afin d'annuler l'action exercée par le magnétisme terrestre et de rendre ainsi le système astatique.

Par suite du sens dans lequel circule le courant dans les diverses bobines de l'instrument, la bobine mobile de droite est repoussée par la bobine fixe inférieure et attirée par la bobine fixe supérieure; au contraire, la bobine mobile de gauche est attirée par la bobine fixe inférieure et repoussée par la bobine fixe supérieure. Les actions ainsi exercées sur les bobines M et M s'ajoutent donc et l'ensemble constitue un électrodynamomètre double.

Dans un électrodynamomètre ordinaire, le couple est proportionnel au carré de l'intensité du courant; dans l'électrodynamomètre-balance, ce couple est proportionnel au double du carré de l'intensité.

Sous l'action des flux engendrés par le passage du courant dans les bobines de l'instrument, l'extrémité de droite du fléau portant les bobines mobiles tend à se relever, tandis que l'extrémité de gauche tend à s'abaisser. Afin de pouvoir mesurer le couple électrodynamique produit, un poids $p$ est fixé à l'extrémité de droite du fléau et à une distance déterminée de l'axe de suspension. Un autre poids $p'$, égal au poids $p$, est placé à l'extrémité de gauche du fléau; ce poids est mobile sur une règle divisée fixée au fléau. Lorsque le poids mobile se trouve placé à la même distance de l'axe de suspension que le poids fixe, le fléau reste en équilibre, à la condition, toutefois, qu'aucun courant ne passe dans les bobines. Lorsqu'un courant, au contraire, les traverse, l'équilibre est rompu par suite des actions électrodynamiques qui s'exercent entre elles et, pour le rétablir, il faut déplacer le poids mobile vers la droite, à une distance $d$. Cela revient à augmenter l'action du poids fixe $p$ d'une quantité qui le rende égal à $pd$; on mesure donc le couple électrodynamique par la longueur du déplacement $d$ qu'il faut faire subir au poids mobile, glissant sur la règle divisée, pour rétablir l'horizontalité du fléau.

En désignant par $k$ une constante de construction, variant avec la valeur du poids $p$, et par $i$ l'intensité du courant à mesurer, on a :

$$i = k\, 2\sqrt{d}.$$

Les bobines de l'électrodynamomètre-balance sont naturellement dépourvues de fer et constituées par du fil de cuivre pur roulé sur des carcasses en carton laqué. Une table, jointe à l'instrument, fait connaître les doubles racines carrées des nombres gravés sur la règle divisée fixée sous le fléau.

Au point de vue des dispositions de construction, les balances lord Kelvin présentent des particularités très ingénieuses. Il suffira, pour les faire connaître, de décrire un des modèles de ces instruments, la balance centiampère (*fig.* 49).

Pour faire arriver le courant à des bobines mobiles, on a le plus souvent recours au système de contacts plongeant dans du mercure; ce système présente des inconvénients et n'est guère applicable dans le cas où il s'agit d'effectuer des mesures précises. Lord Kelvin a évité cette difficulté en faisant arriver le courant aux bobines mobiles par l'intermédiaire d'une série de fils très fins, placés à côté les uns des autres et soudés par leurs extrémités aux pièces fixes + B, — B (*fig.* 51), d'une part, et aux pièces mobiles + A, — A, d'autre part. Ces fils sont également tendus et servent de suspension au fléau, remplaçant ainsi les couteaux habituellement employés dans les balances ordinaires. Ces fils fins peuvent supporter des densités de courant très élevées et leur nombre varie naturellement suivant l'intensité maximum du courant qui doit traverser l'instrument. Ainsi, dans la balance du type kiloampère (*fig.* 54), qui permet de mesurer un courant maximum de 2 500 ampères, chaque suspension est formée de fils de 0,03 mm de diamètre qui, malgré qu'ils soient très rapprochés, occupent néanmoins, sur les pièces AA et BB, des longueurs de 12 à 14 cm. La raideur de cette suspension est négligeable relativement à la valeur des couples à mesurer, grâce à la longueur convenable donnée à cette sorte de ruban souple.

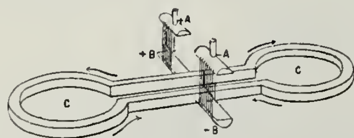


Fig. 51. — Détails de la suspension de l'électrodynamomètre-balance.

Le poids fixe $p$, placé à l'extrémité de droite du fléau et devant occuper une position parfaitement déterminée à une distance constante de l'axe de suspension, affecte la forme d'un cylindre traversé par une longue goupille. Il se pose à plat dans une gouttière, en forme de V, remplaçant le plateau de la balance. Cette gouttière est percée d'un trou dans lequel s'engage la goupille dont est muni le poids. On évite ainsi toute incertitude sur la manière de placer ce poids sur son support.

La masse mobile, qui glisse sur la règle divisée du fléau, se compose d'un curseur ayant un poids déterminé et qui est guidé par une rainure pratiquée dans la règle. Sur ce curseur se place un poids supplémentaire qu'un dispositif, consistant en pointes, oblige à placer toujours de la même manière.

Le socle de la balance est en ardoise vernie; il repose sur trois vis calantes qui permettent de le placer dans une position parfaitement horizontale en se guidant sur les indications d'un niveau à bulle d'air.

Une cage vitrée recouvre l'instrument. Afin de pouvoir manœuvrer le curseur du poids mobile sans qu'il soit nécessaire d'enlever cette cage, un chariot est muni, à droite et à gauche, de cordonnets en soie qui sortent de la cage. La figure 52 représente cette disposition.

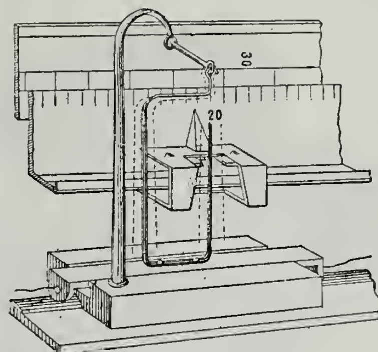


Fig. 52. — Dispositif de manœuvre du poids mobile de l'électrodynamomètre-balance.

Lorsqu'on tire un des cordonnets, la potence fixée sur le chariot entraîne avec elle une tige recourbée en forme d'U, dont la branche la plus courte pousse le curseur. Dès que l'on cesse de tirer sur le cordonnet, la tige en U reprend la position verticale et n'appuie plus sur le curseur, qui reste ainsi parfaitement libre.

Un index, placé sur le curseur, indique exactement la position occupée par le poids mobile sur la règle divisée. Lorsqu'on veut obtenir de très faibles déplacements du curseur, on tire sur l'un des cordonnets, tout en retenant l'autre; l'élasticité de la soie permet alors d'imprimer au système un très petit déplacement. Les lectures se font à l'aide d'une loupe que l'on peut poser sur la cage vitrée.

Pour immobiliser le fléau, il suffit de tourner le bouton moletté qui actionne le mécanisme de relevage de ce fléau. Le bouton est lui-même immobilisé au moyen d'une goupille fixée à une chaînette accrochée sur le socle.

A gauche du bouton moletté, on aperçoit, sur la figure 49, une petite manette qui sert à régler l'horizontalité du fléau au commencement d'une mesure. A cet effet, le milieu du fléau est muni d'une aiguille mobile articulée; en écartant plus ou moins la pointe de l'aiguille du point de suspension du fléau, on modifie la position du centre de gravité du système mobile et on fait incliner le fléau du côté vers lequel a été dirigée la pointe de l'aiguille. La manette commande une fourchette entre les dents de laquelle est engagée la pointe de l'aiguille.

Pour se servir d'un électrodynamomètre-balance, on commence par placer un poids fixe convenable dans la gouttière que porte l'extrémité de droite du fléau, puis le poids correspondant sur le curseur dont on amène l'index en regard du zéro de la règle graduée.

Le fléau pouvant osciller librement, on manœuvre la fourchette qui actionne l'aiguille de réglage jusqu'à ce que le fléau ait pris une position bien horizontale, ce qu'il est facile de constater par la position de deux index, fixés chacun à une des extrémités de la règle divisée et qui se meuvent en regard de traits de repère, gravés sur une petite règle verticale fixée sur le socle. Lorsque la balance est ainsi au zéro, on agit légèrement sur la manette, afin que la fourchette qu'elle commande ne touche plus à l'aiguille de réglage. Naturellement, les diverses opérations qui viennent d'être décrites doivent être effectuées alors qu'aucun courant ne passe dans l'instrument.

Tout étant ainsi disposé, on fait passer le courant à mesurer dans la balance en l'amenant aux bornes placées sous le socle de l'instrument (*fig.* 49). Aussitôt, l'équilibre est détruit, et on ramène le fléau dans la position horizontale, en déplaçant vers la droite et de la quantité voulue le curseur mobile. Il n'y a plus qu'à lire la division devant laquelle se trouve l'index, à chercher ensuite dans la table le double de la racine carrée correspondant au nombre lu et, enfin, à multiplier le résultat par le coefficient affecté à la paire de poids que l'on a employée. Ce coefficient est indiqué dans les différentes cases de la boîte destinée à renfermer les poids.

Lorsqu'on veut se dispenser d'avoir recours à la table, on lit sur une règle fixe placée derrière la règle mobile la double racine carrée du nombre marqué par l'index sur cette dernière. Ce procédé est plus rapide, mais aussi moins exact, car il est facile de commettre une erreur de parallaxe en estimant à quelle division de la règle fixe correspond la division indiquée sur la règle mobile par l'index du chariot.

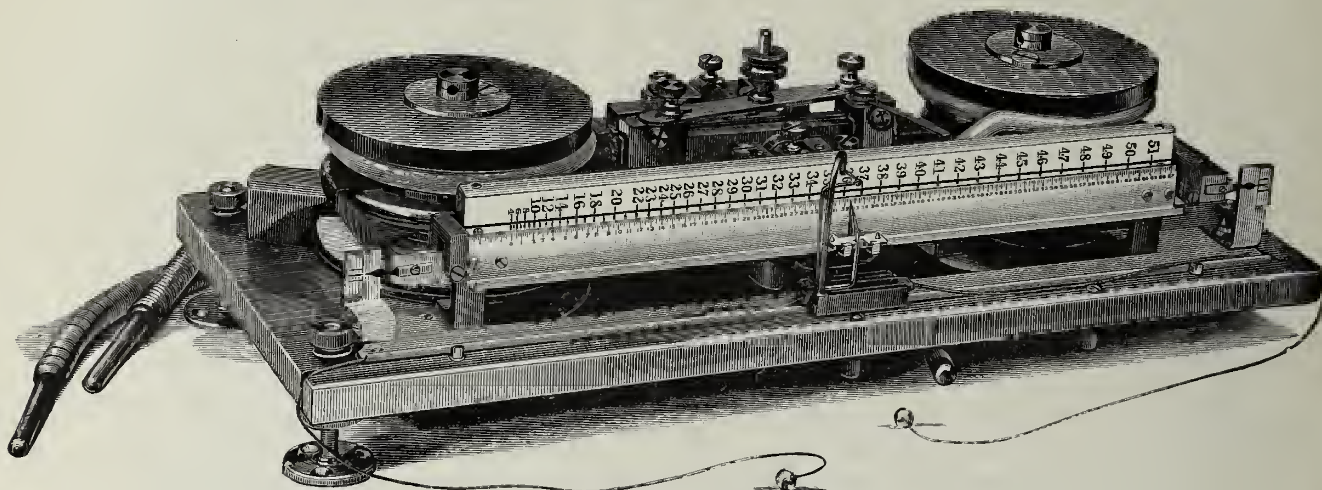


FIG. 53. — Balance décaampère.

Voici les données relatives à la série de poids de la balance centiampère.

| Poids mobiles. | | | Poids fixes. |
|---|---|---|---|
| 1re paire de poids, | curseur seul = 0,8333 gr | | N° 1 = 0,8333 gr |
| 2e | — | curseur plus poids n° 2 de 3,330 gr | N° 2 = 4,1663 gr |
| 3e | — | curseur plus poids n° 3 de 13,332 gr | N° 3 = 14,1653 gr |
| 4e | — | curseur plus poids n° 4 de 53,328 gr | N° 4 = 54,1613 gr |

Les doubles racines carrées des nombres lus sur la règle fixe divisée ou prises dans la table doivent être multipliées par :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0,0025 | lorsqu'on utilise la paire de poids | n° | 1 |
| 0,0050 | — | — | 2 |
| 0,0100 | — | — | 3 |
| 0,0200 | — | — | 4 |

ce qui revient à diviser les doubles racines carrées par :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 400 | lorsqu'on utilise la paire de poids | n° | 1 |
| 200 | — | — | 2 |
| 100 | — | — | 3 |
| 50 | — | — | 4 |

On utilise l'une des paires de poids suivant l'intensité du courant à mesurer.

Avec la paire n° 1 on peut mesurer de 0 à 0,125 ampère.

Avec la paire n° 2, de 0 à 0,250 ampère.

Avec la paire n° 3, de 0 à 0,500 ampère.

Avec la paire n° 4, de 0 à 1 ampère.

La résistance totale des bobines est de 55 ohms à la température de 17° centigrades.

La balance centiampère comme, du reste, les autres modèles, peut supporter, sans échauffement sensible et d'une façon continue, un courant ayant une intensité égale à 75 0/0 de l'intensité maximum que l'instrument peut mesurer.

Il se construit cinq modèles d'électrodynamomètres lord Kelvin :

1° Balance centiampère (*fig.* 49), pouvant mesurer de 1 à 100 centiampères ;

2° Balance déciampère, pouvant mesurer de 1 à 100 déciampères ;

3° Balance décaampère (*fig.* 53), pouvant mesurer de 1 à 100 ampères;

4° Balance hectoampère, pouvant mesurer de 6 à 600 ampères ;

5° Balance kiloampère (*fig.* 54), pouvant mesurer de 25 à 2 500 ampères.

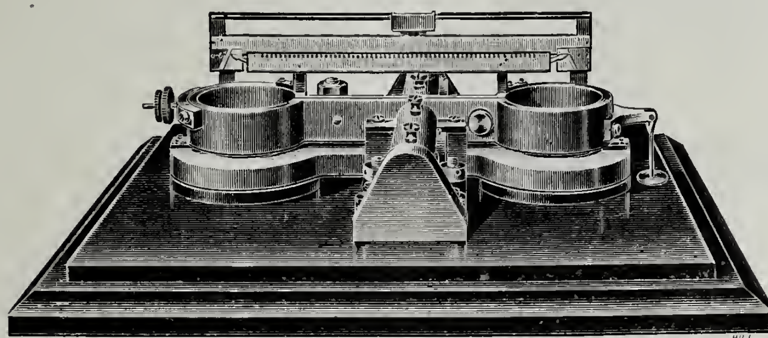


Fig. 54. — Balance kiloampère.

Dans ces divers modèles de balances, l'emploi des courants alternatifs donnerait lieu à la production de courants de Foucault qui troubleraient les lectures, sauf, toutefois, dans la balance centiampère. Pour la mesure des courants alternatifs, les bobines sont constituées par des fils isolés séparément et enroulés en parallèle. On évite ainsi les perturbations qu'entraîne l'emploi de conducteurs massifs.

La balance kiloampère ne se prête qu'à la mesure des courants continus.

III

# ÉLECTROMÈTRES

## ÉLECTROMÈTRE ABSOLU

**Électromètre Bichat et Blondlot.** — Cet instrument (*fig.* 55), construit et exposé par M. E. Ducretet, se compose de deux cylindres métalliques A et B, disposés concentriquement.

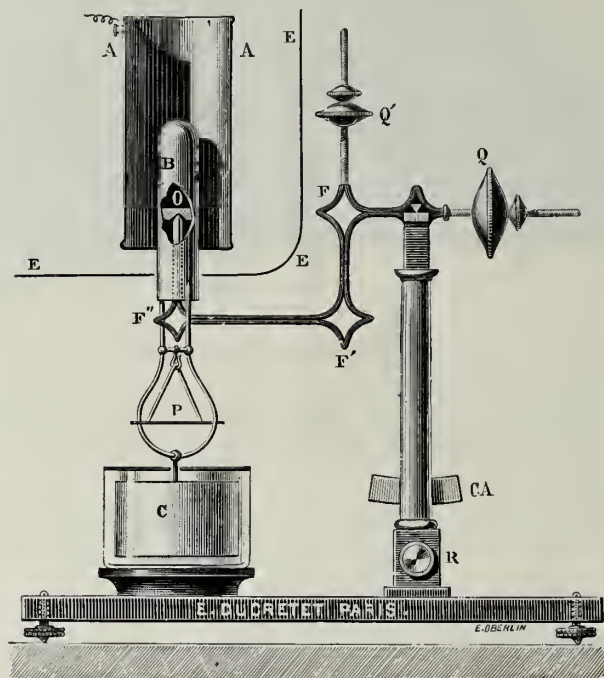



Fig. 55. — Électromètre absolu Bichat et Blondlot.

Le cylindre A est fixe et le cylindre mobile B est supporté en O par un fléau de balance QFF′F″ que l'on équilibre au moyen d'un contrepoids Q.

A sa partie inférieure, le cylindre B est muni d'un support auquel s'accroche un plateau P destiné à recevoir des poids marqués et un amortisseur à air C.

Sous l'action d'une charge électrique, le cylindre B est attiré à l'intérieur du cylindre A. On rétablit alors l'équilibre du fléau en plaçant des poids convenables dans le plateau P.

Les tensions sont mesurées par la valeur des poids nécessaires pour rétablir l'équilibre et l'instrument est gradué d'après ses dimensions géométriques.

Lorsque la tension est suffisante pour qu'il se produise une étincelle entre les deux cylindres, on ne peut effectuer la mesure. La distance explosive est de 22 mm et correspond à une tension de 106 unités électrostatiques.

## ÉLECTROMÈTRES A GRADUATION EMPIRIQUE

**Électromètre portatif lord Kelvin.** — Cet instrument (*fig.* 56) est une simplification de l'électromètre absolu de lord Kelvin.

Il se compose d'un vase en verre au fond duquel se trouve une jauge ou armature *p* de surface déterminée d'un condensateur, dont l'autre armature est constituée par des feuilles d'étain collées sur la surface extérieure du vase. D'autres feuilles d'étain, collées sur la surface intérieure, sont reliées à la jauge *p*, qui peut être attirée par un plateau A qu'une vis micrométrique C permet d'éloigner plus ou moins. Les feuilles d'étain, intérieures et extérieures, sont respectivement mises en communication avec les pôles d'une pile de charge. Pour comparer des différences de potentiel, on charge successivement le plateau A et on le rapproche ou on l'éloigne de la jauge *p*, jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice, dont est munie cette dernière, se trouve au zéro, ce que l'on constate en regardant à travers la loupe *l*.

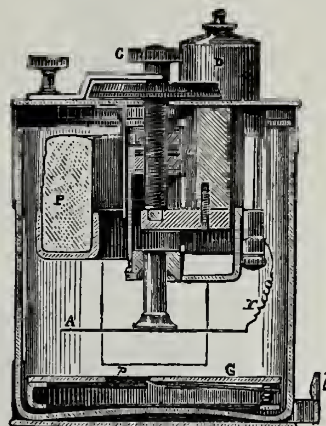


Fig. 56. — Électromètre portatif lord Kelvin.

Le rapport des distances du plateau A à la jauge *p* fait connaître la différence de potentiel.

La sensibilité de cet instrument varie suivant la force électromotrice de la pile de charge.

Pour maintenir une atmosphère parfaitement sèche à l'intérieur du vase, on place dans une coupe annulaire un morceau de pierre ponce P, imbibée d'acide sulfurique concentré.

**Électromètres Mascart.** — L'électromètre symétrique Mascart, construit et exposé par M. J. Carpentier, se compose (*fig.* 57) d'une boîte cylindrique creuse fendue suivant deux diamètres perpendiculaires et formant quatre secteurs fixes et creux situés dans un même plan. Le secteur mobile, en forme de 8, se déplace à l'intérieur des secteurs fixes ; il est fixé à une suspension bifilaire en fil de cocon et se prolonge, vers le bas, par un fil de platine, plongeant dans un vase contenant de l'acide sulfurique pur et concentré, qui sert à relier le secteur mobile aux sources d'électricité à mesurer. Un petit miroir, fixé sur le fil de platine, permet de lire la déviation sur une échelle graduée.

Les secteurs fixes sont reliés deux à deux en diagonale à l'aide de fils isolés. Chaque paire est, en outre, reliée respectivement à l'un des pôles d'une pile à eau dont l'élément situé au milieu de la batterie est en communication avec la terre. Ces paires de secteurs sont ainsi chargées à des potentiels égaux, mais de signes contraires.

Le secteur mobile est mis en communication successivement avec le pôle positif du générateur à étudier, puis avec le pôle négatif ; on note les déviations obtenues, déviations qui sont de sens inverse. Ces déviations sont proportionnelles au potentiel du secteur mobile, c'est-à-dire du générateur à étudier.

On peut employer l'électromètre Mascart d'une manière différente en reliant une paire de secteurs fixes à la terre, l'autre étant en communication avec le secteur mobile et le générateur à étudier. Dans ce cas, les déviations sont proportionnelles aux carrés des potentiels et sont toujours de même sens.

Cet instrument n'est pas apériodique ; il est très sensible, mais son installation et son maniement exigent beaucoup de soins.

M. E. Ducretet construit un modèle d'électromètre Mascart à quadrants que représente la figure 58.

La suspension bifilaire, ordinairement en fils de cocon, est ici en fils métalliques très fins. La cuvette R a deux compartiments concentriques : celui du milieu contient de l'huile dans laquelle

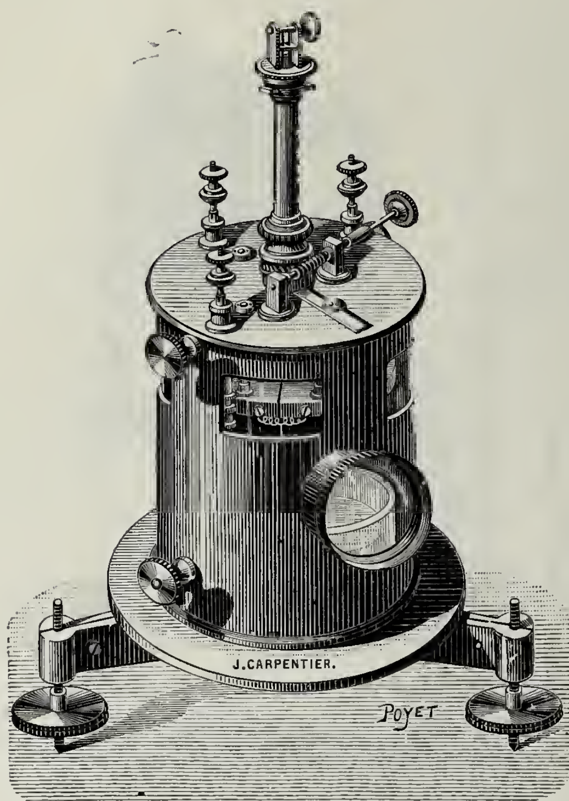



Fig. 57. — Électromètre Mascart, modèle J. Carpentier.

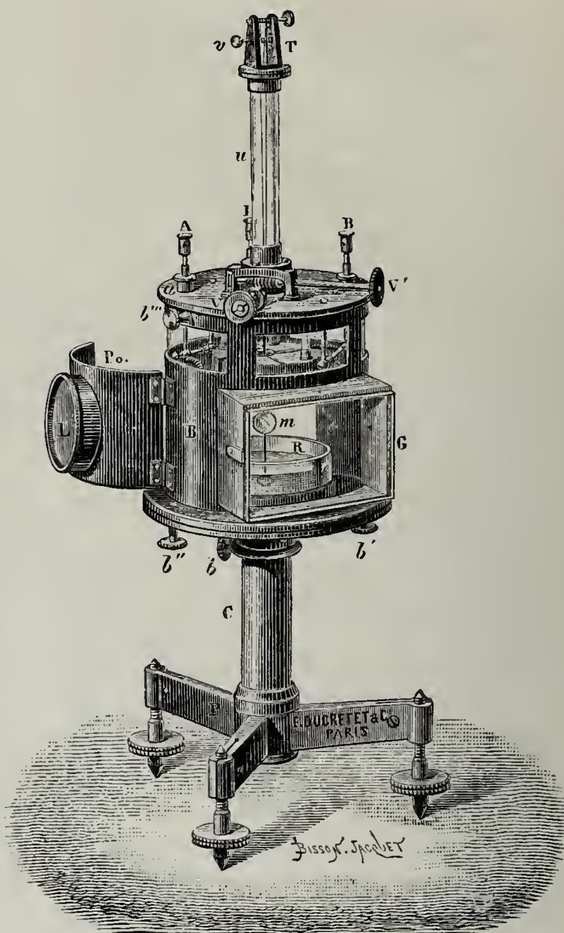



Fig. 58. — Électromètre Mascart, modèle Ducretet.

plonge l'amortisseur de l'équipage mobile ; le compartiment extérieur renferme de l'acide sulfurique concentré destiné à absorber l'humidité.

**Électromètre astatique Blondlot et Curie.** — Cet instrument (*fig.* 59) est une transformation de l'électromètre à quadrants de lord Kelvin. L'armature mobile est constituée par quatre secteurs métalliques fixés dans un même plan sur un support en ébonite A*i*. Les armatures fixes, au nombre de deux, $P_1$ et $P_2$, sont également formées de quatre secteurs ; elles sont disposées de manière à pouvoir être éloignées ou rapprochées de l'armature mobile.

Les armatures fixes et mobile sont chacune constituées par un disque d'ébonite qui supporte les secteurs formés d'une mince couche d'argent métallique.

L'angle que forment les diamètres suivant lesquels sont coupés les secteurs de l'armature et ceux des armatures fixes est voisin de 45° et les secteurs opposés par le sommet sont reliés électriquement.

L'armature mobile est suspendue par des fils métalliques très fins $f, f'$, l'un en haut, l'autre en bas, qui servent à produire le couple de torsion et à relier les points entre lesquels existe une différence de potentiel aux deux paires de secteurs de cette armature.

Quatre bornes A, B, C, D, reliées respectivement aux paires de secteurs des armatures fixes et

de l'armature mobile, permettent de les charger. Sous l'action des charges appliquées à ces paires de secteurs, il se produit une déviation que l'on apprécie par la méthode objective, grâce au miroir $m$ muni d'ailettes servant d'amortisseur.

Cet instrument peut aussi être utilisé comme wattmètre électrostatique en effectuant les connexions qui seront indiquées dans le chapitre consacré aux wattmètres.

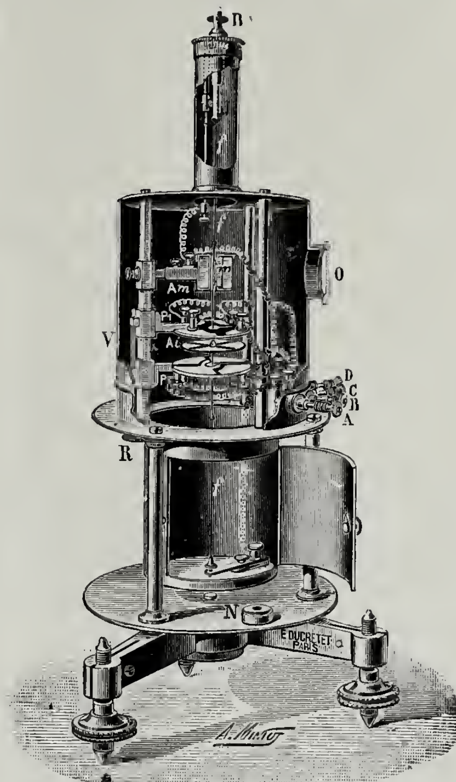


Fig. 59. — Électromètre Blondlot et Curie.

**Électromètre apériodique J. Carpentier.** — Cet électromètre (*fig.* 60) a une armature mobile constituée par un cadre rectangulaire en aluminium dont les parties verticales sont cylindriques et exactement de révolution autour de l'axe. L'armature fixe est constituée par un cylindre de fer doux, divisé en quatre secteurs, muni d'une enveloppe extérieure en laiton, également divisée, qui forme avec les secteurs en fer correspondants deux paires de quadrants ; chaque secteur comprend donc une partie en fer et son enveloppe en laiton. Les secteurs intérieurs en fer doux servent en même temps de noyau pour fermer le circuit magnétique d'un système d'aimants en U entre les pôles duquel se trouve placé le cadre en aluminium.

Comme dans l'électromètre Mascart, les secteurs fixes diamétralement opposés sont reliés entre eux, mais sont soigneusement isolés des secteurs adjacents, ainsi que de l'armature mobile.

Cette armature est suspendue entre deux fils métalliques placés dans le prolongement l'un de l'autre ; le fil supérieur porte un miroir servant à effectuer les lectures par la méthode objective. Ces fils de suspension produisent le couple résistant.

Le socle de l'instrument est en ébonite et porte trois bornes : la borne du milieu est reliée à l'armature mobile par l'intermédiaire des fils métalliques de suspension ; les deux autres sont respectivement en communication avec les deux paires de secteurs de l'armature fixe.

Sous l'influence d'une charge, le cadre mobile est dévié et, comme on le relie généralement à l'une des paires de secteurs fixes, les déviations sont proportionnelles aux carrés des charges, c'est-à-dire aux carrés des forces électromotrices ou des différences de potentiel à mesurer.

Le système d'aimants utilisé dans cet électromètre a pour objet d'amortir les oscillations du cadre mobile, grâce aux courants induits qui se produisent pendant son déplacement. En pratique, l'apériodicité de l'instrument est aussi grande que celle qui est obtenue dans les galvanomètres Deprez-d'Arsonval.

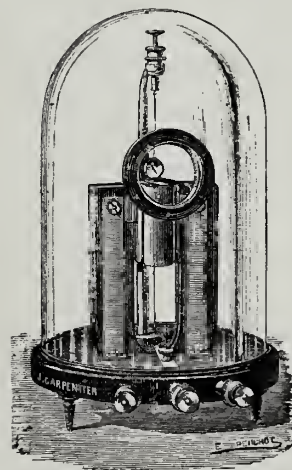



Fig. 60. — Électromètre apériodique Carpentier.

Cet instrument peut donner une déviation de 250 mm pour une différence de potentiel de 75 volts. En employant la méthode hétérostatique avec une pile de charge de 100 éléments, on peut obtenir une déviation de 10 mm par volt.

**Électromètre Hallwachs.** — Cet électromètre à quadrants, construit et exposé par la maison Stieberitz, de Dresde, est caractérisé par une suspension métallique de l'armature mobile que l'on peut charger directement, évitant ainsi une connexion par l'intermédiaire d'un liquide, dispositif pouvant causer des erreurs par suite de la capillarité.

L'armature mobile est suspendue à un fil de platine de 0,03 mm de diamètre, préparé spécialement pour conserver un coefficient d'élasticité parfaitement constant.

Les oscillations sont rendues presque apériodiques par l'action d'un amortisseur à air. Avec la méthode idiostatique, on obtient une déviation de 10 mm par volt sur une échelle placée à 2 m du miroir; avec la méthode hétérostatique, on peut obtenir une déviation de 150 mm par volt.

**Électromètre Nernst et Dolezalek.** — Cet instrument, construit par M. Bartels, de Gœttingue et exposé par l'Institut Royal physico-chimique de la même ville, se compose de deux électromètres à quadrants superposés l'un à l'autre et dont les armatures mobiles, reliées invariablement entre elles, sont suspendues à une fibre de quartz très fine.

La charge des armatures mobiles est assurée d'une façon permanente par une pile sèche de Dolezalek et Nernst (étain et peroxyde de plomb), renfermée dans un tube léger qui sert à relier les deux armatures et qui a une force électromotrice de plusieurs centaines de volts.

Les deux séries de quadrants des armatures fixes étant reliées aux points entre lesquels existe la différence de potentiel à mesurer de façon que les charges électrostatiques s'ajoutent, on obtient, sans pile de charge extérieure et sans replenisher, un électromètre très sensible, permettant de mesurer $10^{-5}$ volts.

**Électromètre Bornhauser.** — Cet instrument, construit ar M. Bornhauser, de Charlottenbourg, d'après le principe de l'électromètre de V. Bjerknes, était exposé par l'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg. Cet électromètre, avec lecture au miroir, est utilisé pour mesurer des tensions alternatives de plusieurs milliers de volts, après avoir été gradué au moyen d'une batterie à haute tension.

**Électromètre Hoor.** — Cet électromètre à quadrants, du genre lord Kelvin, a été construit et exposé par la maison Ganz, de Budapest. L'armature mobile, en forme de 8, est en aluminium; elle est suspendue par un fil de platine. Les quatre quadrants de l'armature fixe sont placés dans un plan au-dessous de l'armature mobile.

---

IV

# AMPÈREMÈTRES ET VOLTMÈTRES

---

### INSTRUMENTS ÉLECTRODYNAMIQUES

**Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.** — Ces instruments, spécialement établis pour être utilisés avec les courants alternatifs, doivent remplir les mêmes conditions de sensibilité, de précision et d'amortissement que les instruments employés avec le courant continu et, de plus, donner des indications qui soient indépendantes de la forme de la courbe des courants et de leur fréquence.

Les ampèremètres et les voltmètres électrodynamiques construits et exposés par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft de Berlin remplissent toutes ces conditions dans les limites industrielles que permettent les courants alternatifs.

Le défaut d'apériodicité étant le principal obstacle à l'emploi de ces instruments, les constructeurs ont pu surmonter cette difficulté en utilisant un amortisseur électromagnétique.

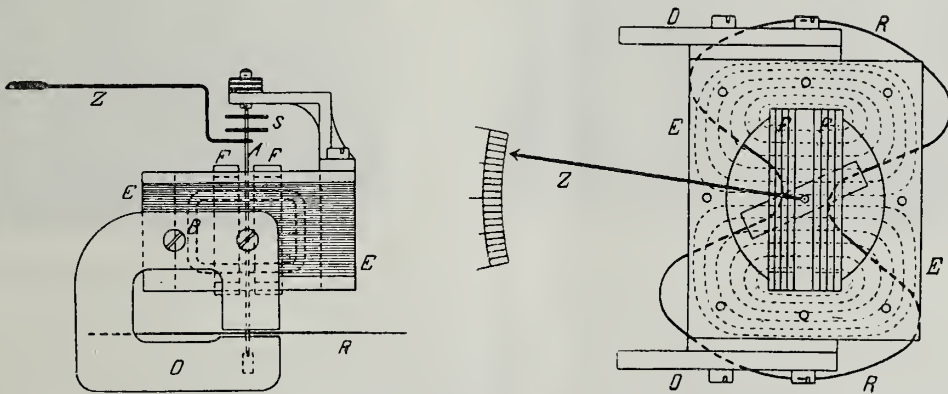



Fig. 61. — Détails de construction des instruments électrodynamiques de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

La figure 61 montre la disposition adoptée : E est une pièce, formée de tôles assemblées, au milieu de laquelle est pratiquée une ouverture, limitée par des arcs de cercle, dans laquelle est placée la bobine F. A l'intérieur de cette bobine F, se trouve la bobine B, mobile et portée par l'axe A monté sur pivots; cet axe porte en même temps l'aiguille Z et une plaque d'aluminium R en forme de 8, dont les bords s'engagent entre les pôles de deux aimants amortisseurs D. L'entrefer de ces aimants est réduit au minimum afin d'augmenter l'amortissement; ils ont leurs pôles disposés de manière à compenser la faible action qu'ils pourraient avoir sur la bobine mobile dont ils sont d'ailleurs éloignés le plus possible.

La pièce de fer feuilletée E a pour objet de concentrer le flux magnétique développé par

les bobines et à leur donner la forme que montre le dessin de droite de la figure 61. Dans ces conditions, les aimants amortisseurs ne sont pas influencés par les flux magnétiques développés par les bobines.

Dans les ampèremètres (*fig.* 62), la bobine fixe est parcourue par le courant à mesurer, tandis que la bobine mobile est montée en dérivation sur l'ensemble constitué par la bobine fixe et une résistance mise en série avec elle.

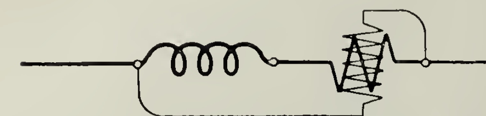


Fig. 62. — Connexions des bobines de l'ampèremètre électrodynamique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

La figure 63 montre l'intérieur d'un ampèremètre dont le cadran a été enlevé. La bobine fixe peut être divisée en deux parties, lorsqu'on veut que l'instrument ait deux échelles de sensibilités différentes.

Le coefficient de température du métal dont est fait le fil des bobines n'est pas négligeable, comme c'est le cas, du reste, pour les ampèremètres électromagnétiques à bobine mobile ; car si on voulait mettre en dérivation une forte résistance indépendante des variations de température, on

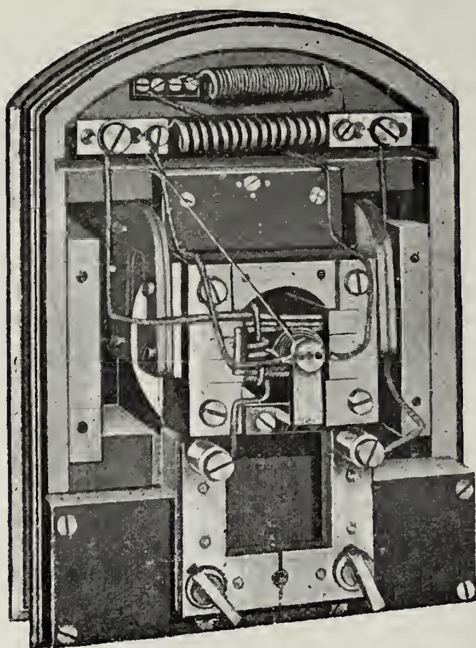


Fig. 63. — Ampèremètre électrodynamique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

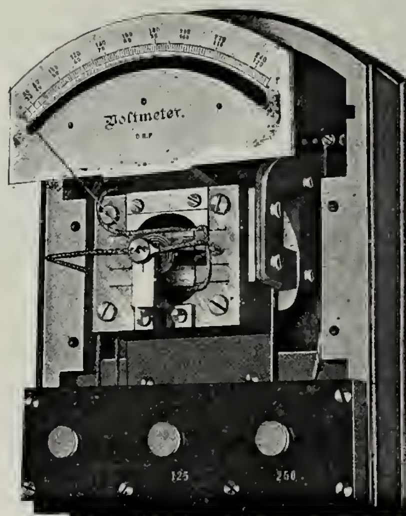



Fig. 64. — Voltmètre électrodynamique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

serait obligé de monter en série, avec la bobine fixe, une résistance qui consommerait beaucoup d'énergie. Il est, du reste, facile de compenser l'effet du coefficient de température en prenant, pour constituer les bobines fixes, un métal dont le coefficient de température soit le même que celui de la dérivation.

Dans le voltmètre (*fig.* 64), la bobine fixe et la bobine mobile sont mises en série avec une résistance additionnelle. L'instrument comporte deux échelles, l'une allant jusqu'à 125 volts et l'autre jusqu'à 250 volts. La résistance totale des deux bobines est d'environ 130 ohms et la résistance additionnelle de 2 000 ohms, soit en tout 2 130 ohms. Dans ces conditions, la puissance absorbée par l'instrument pour son fonctionnement est de 3 watts à 250 volts, consommation très faible pour des instruments de ce genre.

Le coefficient de température de la résistance additionnelle étant très faible, on peut considérer comme négligeable celui de l'ensemble, car il est d'environ 0,0024.

Dans les ampèremètres, comme dans les voltmètres, le couple produisant la déviation de

l'aiguille dépend de l'intensité du courant qui traverse la bobine mobile, intensité qui varie suivant l'impédance de cette bobine. Théoriquement, les indications de ces instruments dépendent de la fréquence ; en réalité, cette action est négligeable, car l'impédance diffère très peu de la résistance, parce que les bobines se déplacent dans un espace de très grande réluctance, puisque les flux ne traversent le fer qu'à leur retour, la majeure partie du circuit magnétique étant constituée par l'air.

Quant à l'hystérésis, l'induction dans le fer est si faible qu'on ne remarque aucune influence.

La meilleure preuve que les indications données par ces instruments sont indépendantes de la fréquence est que, pour un courant de fréquence 50 et pour un courant continu, les indications sont sensiblement les mêmes. Par suite, l'influence de la forme de la courbe est absolument négligeable.

**Voltmètre du laboratoire Volta.** — Cet instrument, construit et exposé par la maison Gaiffe, de Paris, se compose de deux bobines fixes B et B′ (*fig.* 65), entre lesquelles, montée sur pivots, est placée une bobine mobile *b*, dont l'enroulement est disposé, de part et d'autre de l'axe, sur une carcasse en bois durci.

Les bobines fixes et mobile sont reliées en série et les communications avec cette dernière sont établies par l'intermédiaire de ressorts spiraux qui produisent, en même temps, le couple antagoniste.

Une résistance non inductive R, montée en tension avec les bobines du voltmètre, complète cet instrument.

La bobine mobile ne pèse que 5 grammes.

Une clé permet de mettre en court-circuit une partie de la résistance additionnelle afin de faire varier la sensibilité de ce voltmètre qui, par suite, porte deux graduations : l'une de 25 à 75 volts et l'autre de 50 à 150 volts. On remarquera que les graduations ne peuvent commencer à zéro, car le couple produisant la déviation serait à ce moment insuffisant pour produire une action utile sur la bobine mobile.

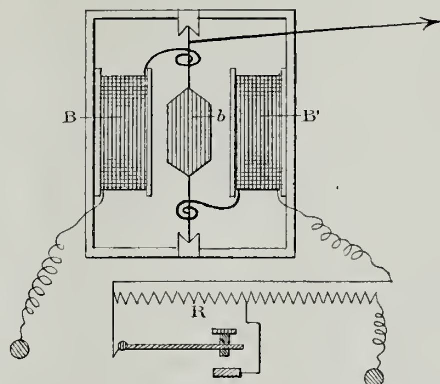



Fig. 65. — Voltmètre électrodynamique du laboratoire Volta.

Ce voltmètre peut être utilisé aussi bien avec les courants alternatifs qu'avec le courant continu. Dans ce dernier cas, l'erreur ne dépasse pas 0,5 0/0 lorsqu'on fait varier la fréquence entre 10 et 80 périodes par seconde.

Pour étalonner cet instrument, on peut employer un courant continu, mais à la condition de renverser le sens du courant chaque fois que l'on veut déterminer un point de la graduation. On élimine ainsi l'action perturbatrice exercée par le champ magnétique terrestre ; il suffit de prendre la moyenne des deux lectures effectuées chacune avec un même courant de sens différent pour obtenir une graduation exacte.

### INSTRUMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

**Instruments à bobine et à aimant fixes avec fer doux mobile.** — Ces instruments ne peuvent être utilisés que pour le courant continu. La diminution du moment magnétique de l'aimant avec le temps et aussi par suite de leur fonctionnement en a limité l'emploi.

Ampèremètre et voltmètre Deprez-Carpentier. — Ces instruments (*fig.* 66) se composent d'une bobine fixe B et d'une pièce de fer doux ou armature A, mobile autour d'un axe *a* ; cette armature, placée à l'intérieur de la bobine B, est orientée par un double aimant recourbé NS et N′S′ et porte une aiguille indicatrice G qui se déplace sur un cadran gradué.

L'équipage mobile est équilibré et l'instrument peut être utilisé indifféremment dans une position horizontale ou verticale.

Ces instruments indiquent par construction le sens du courant, lorsque les communications sont établies normalement.

Dans les ampèremètres, l'enroulement de la bobine B est constitué par une lame de cuivre rouge isolée et enroulée plusieurs fois sur elle-même ; cette lame a 1 cm de largeur et une épaisseur variable suivant l'intensité maximum du courant que doit mesurer l'instrument.

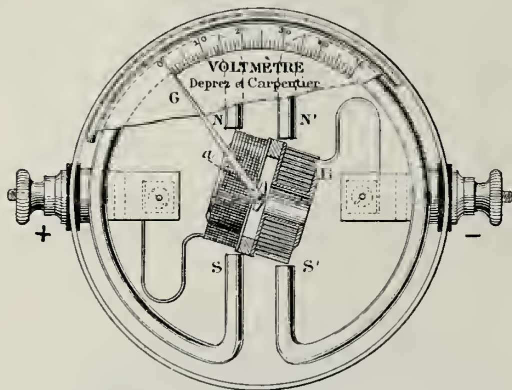


Fig. 66. — Voltmètre Deprez-Carpentier.

Dans les voltmètres, l'enroulement est fait en fil fin isolé et la résistance de la bobine est appropriée à la différence de potentiel maximum pour laquelle l'instrument a été établi.

Ces instruments sont apériodiques et ce sont les aimants NS et N'S' qui sont utilisés comme force antagoniste s'opposant à l'action exercée par le flux de la bobine sur l'armature mobile.

Pour rendre les déviations à peu près proportionnelles soit à l'intensité du courant, soit à la différence de potentiel, résultat qu'on n'aurait pu obtenir si l'axe de la bobine avait été placé normalement à la ligne des pôles des aimants, puisque le couple dû à l'action du courant aurait été en s'affaiblissant à mesure que la déviation de l'équipage mobile aurait augmenté, la bobine a été légèrement inclinée sur la ligne des pôles. Dans ces conditions, le passage du courant dans la bobine tend à ramener l'armature dans une position parallèle aux spires de l'enroulement et le couple exercé par la bobine croît alors en même temps que celui que produisent les aimants directeurs.

La sensibilité de ces instruments peut être réduite à l'aide d'un shunt approprié qui se relie aux bornes en même temps que les conducteurs du circuit.

Ces instruments sont construits et exposés par M. J. Carpentier, de Paris.

Voltmètre J. Richard. — Cet instrument, qui n'a que 8 cm de diamètre, est plus spécialement destiné à l'essai des piles et des accumulateurs (*fig.* 67).

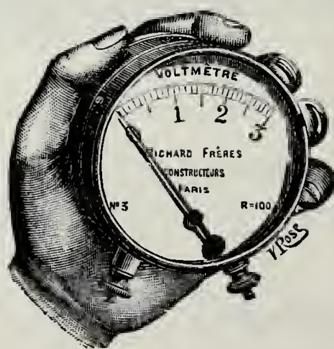


Fig. 67. — Voltmètre J. Richard pour l'essai des accumulateurs.

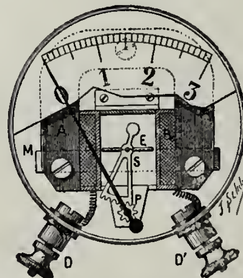


Fig. 68. — Détails de construction du voltmètre J. Richard.

Il comporte une bobine fixe B (*fig.* 68) que parcourt le courant à mesurer et un équipage mobile constitué par une armature de fer doux E, mobile autour d'un axe passant par son centre de gravité. La force antagoniste est produite par un aimant en fer à cheval A. Cet aimant est solidement fixé sur une platine en cuivre au moyen de trois fortes vis ; sur la même platine et

entre les pôles de l'aimant, est montée la carcasse de la bobine, dont les extrémités de l'enroulement aboutissent à deux bornes D, D′ servant de prises de courant.

L'équipage mobile, placé au centre de la bobine, est monté sur un axe pivotant sur agates; il porte un secteur S, à denture très fine, engrenant avec un pignon P. C'est sur l'axe de ce pignon qu'est fixée l'aiguille indicatrice qui se meut devant un cadran divisé. Pour que ces deux axes qui se commandent soient toujours à une distance invariable, ils sont montés dans une chape commune qui les rend solidaires, disposition essentielle pour obtenir un bon fonctionnement.

Toutes les pièces de l'instrument étant équilibrées, la position de l'aiguille est indépendante de la position donnée au voltmètre.

L'angle de déviation de l'armature, sous l'action du courant traversant la bobine, est amplifié au moyen du secteur denté et du pignon qu'il commande ; on obtient ainsi un grand déplacement de l'aiguille pour un faible déplacement de l'armature. L'amplification mécanique des déviations présente l'avantage de produire des déplacements de l'aiguille sensiblement proportionnels aux courants, puisque l'armature, se déplaçant très peu, reste toujours dans un champ magnétique à peu près constant.

Ce qui caractérise cet instrument, c'est l'emploi d'un aimant armé; l'armature de l'aimant étant constituée par une barrette de fer doux M, maintenue par une lame de laiton reposant sur deux piliers fixés sur la platine de l'instrument. Dans ces conditions, le circuit magnétique de l'aimant étant fermé, l'aimantation reste sensiblement constante; en outre, en faisant varier la position de cette barrette, on obtient un couple directeur plus ou moins élevé et on peut modifier à volonté la sensibilité de l'instrument.

Suivant la résistance donnée à l'enroulement de la bobine B, l'instrument peut être utilisé comme voltmètre ou comme ampèremètre.

L'instrument est apériodique et, comme il est polarisé, le sens de la déviation de l'aiguille dépend du sens dans lequel passe le courant.

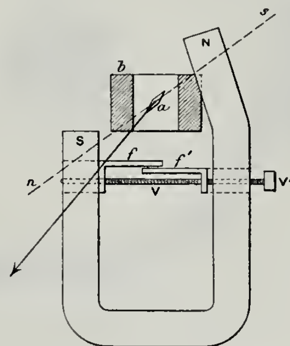


Fig. 69. — Voltmètre Th. Horn.

Voltmètre Th. Horn. — Le D[r] Th. Horn, de Leipzig, avait exposé un voltmètre dont la figure 69 montre la disposition schématique.

A l'intérieur d'une bobine fixe *b* est placée une armature mobile en fer doux *a*. Un aimant NS, dont la branche N est plus longue que la branche S, a cette branche N recourbée de manière que le flux agissant sur l'armature *a* ait une direction oblique. Dans ces conditions, l'action de cet aimant se combine avec celle de la bobine *b*, traversée par le courant, pour donner à l'armature *a* une orientation résultante. La bobine *b* est placée obliquement par rapport à la ligne *sn*.

L'aimant est armé partiellement par un shunt magnétique constitué par deux pièces de fer doux *ff′*, que l'on peut rapprocher ou éloigner en agissant sur le bouton V′ de la vis V à deux filets de sens inverse.

**Instruments à bobine fixe et à fer doux mobile.** — Parmi les nombreux modèles exposés, nous citerons les suivants :

Ampèremètre et voltmètre Javaux. — Ces instruments ont été les premiers construits parmi ceux qui sont basés sur les actions attractive et répulsive de légères pièces de fer doux aimantées par le courant qui traverse la bobine à l'intérieur de laquelle elles sont placées.

A l'intérieur d'une bobine A (*fig.* 70) se trouvent deux pièces de fer doux fixes B, B et une autre pièce de fer doux mobile F pouvant osciller autour des pivots qui la supportent. La force antagoniste est produite par l'action de la pesanteur sur un contrepoids qui tend à ramener constamment dans sa position initiale l'aiguille indicatrice D, solidaire de la pièce F.

Pour que ces instruments fonctionnent régulièrement, il est nécessaire qu'ils soient placés

dans une position parfaitement verticale. On arrive facilement à ce résultat, lorsqu'on les met en place, en inclinant l'instrument à gauche ou à droite jusqu'à ce que l'aiguille indicatrice se trouve bien en regard du zéro de la graduation quand il ne passe pas de courant.

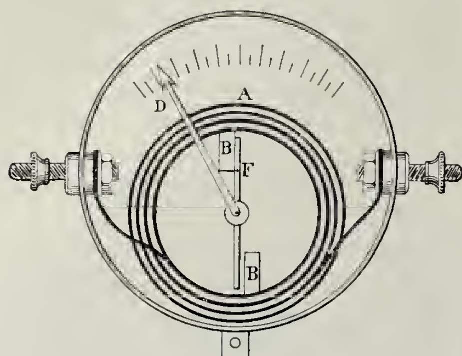


Fig. 70. — Ampèremètre Javaux.

L'absence de tout ressort donne à ces instruments une grande constance et le volume des pièces de fer doux est si minime que les effets dus à l'hystérésis n'entraînent qu'une faible erreur de 2 0/0 au maximum.

Ampèremètres et voltmètres Chauvin et Arnoux. — Les ampèremètres et voltmètres Chauvin et Arnoux, type industriel et type demi-précision (*fig.* 71 et 72), sont constitués par une bobine ayant comme noyau une bande de tôle de fer très mince affectant en plan la forme que montre la figure 73.

La partie AB de ce noyau est repliée pour venir en A au centre de la circonférence. En ce point A se trouve, fixée sur deux pivots, une plaque de tôle AC, également très mince, qui est



Fig. 71. — Ampèremètre Chauvin et Arnoux, type industriel.

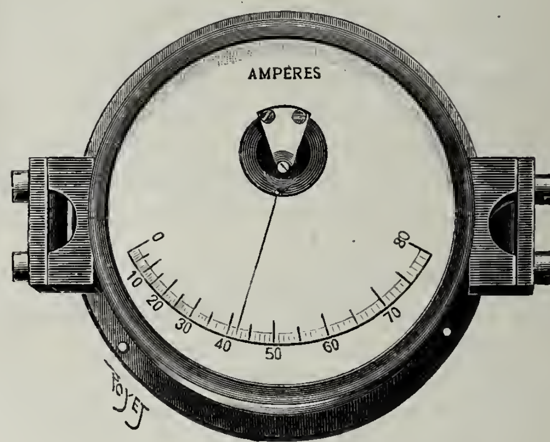


Fig. 72. — Ampèremètre Chauvin et Arnoux, type demi-précision.

mobile autour du point A et peut venir s'appliquer contre la partie fixe AB. Lorsqu'un courant circule dans la bobine, le noyau s'aimante et le volet mobile AC, qui est en contact avec elle, prend la même polarité ; il y a, par conséquent, répulsion. Une aiguille indicatrice est solidaire du volet mobile AC et se meut devant les divisions du cadran gradué. Comme couple antagoniste, on utilise un ressort spiral qui tend à ramener constamment l'aiguille au zéro de la graduation. Cette aiguille étant équilibrée, l'instrument fonctionne dans toutes les positions.

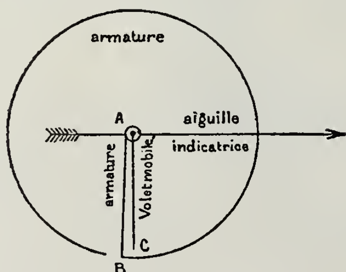


Fig. 73. — Détails de construction des voltmètres et ampèremètres Chauvin et Arnoux.

Les voltmètres ne diffèrent des ampèremètres que par la résistance de la bobine fixe.

Ampèremètre pour courants alternatifs du laboratoire Volta. — Cet instrument, construit et exposé par la maison Gaiffe, comporte une bobine fixe au centre de laquelle est disposé un tube en fer doux *a*, également fixe et muni d'un bras *c* (*fig.* 74).

Au centre du tube fixe $a$, est monté sur pivots un axe en fer doux $b$, qui est muni également d'un bras $c'$, mobile avec lui.

Sous l'action du passage du courant dans l'instrument, il se produit des répulsions entre les bras fixe et mobile qui prennent la même polarité. Le couple produit est d'autant plus grand que les bras sont plus longs.

Entre les limites de 40 à 80 périodes par seconde, les écarts des indications, du fait de l'hystérésis, ne dépassent pas 4 à 5 0/0.

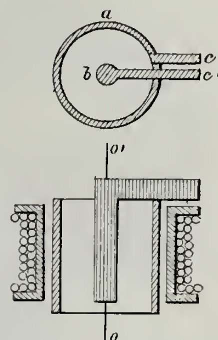


Fig. 74. — Ampèremètre pour courants alternatifs du laboratoire Volta.

Ampèremètre et voltmètre de la Compagnie générale d'électricité de Creil (anciens établissements Daydé et Pillé). — Ces instruments (*fig.* 75) ont un équipage mobile constitué par une mince feuille de tôle rectangulaire fixée par un de ses grands côtés sur un axe monté sur pivots.

Cette feuille de tôle affecte la forme d'une portion de cylindre et l'axe de rotation est excentré par rapport à celui de la bobine fixe qui entoure cette armature.

Sous l'influence du champ magnétique développé par le passage du courant dans la bobine fixe, l'extrémité libre de la feuille de tôle, constituant l'armature, tend à se rapprocher de la bobine. L'effort antagoniste est produit par l'action de la pesanteur sur un contrepoids que porte l'axe de l'aiguille indicatrice.



Fig. 75. — Ampèremètre de la Compagnie Générale d'Electricité de Creil.

Les voltmètres ne diffèrent des ampèremètres que par l'enroulement de la bobine. Ces instruments commencent à donner des indications pour une valeur d'intensité ou de tension voisine du dixième de la valeur maximum pour laquelle ils sont établis. On peut les utiliser avec les courants continus et aussi avec les courants alternatifs; mais, dans ce dernier cas, leurs indications ne sont valables que pour la fréquence des courants qui ont servi à les étalonner.

Ampèremètres et voltmètres J. Richard. — Ces instruments (*fig.* 76) sont combinés en vue d'obtenir un grand déplacement angulaire de l'aiguille indicatrice, en même temps qu'une proportionnalité presque parfaite entre les intensités ou les tensions du courant à mesurer et les angles de déviation.

Ces instruments se composent d'un électro-aimant, traversé par le courant à mesurer, qui agit sur une armature en fer doux mobile autour d'un axe parallèle à ceux des bobines de l'électro-aimant. Cette armature, dont la forme rappelle celle d'une hélice (*fig.* 77), a une surface incurvée par rapport au plan passant par l'extrémité des noyaux. L'enroulement des bobines de l'électro-aimant est constitué, dans l'ampèremètre, par des lames de cuivre rouge isolées, dont l'épaisseur varie d'après l'intensité maximum du courant pour laquelle l'instrument a été établi et, dans le voltmètre, par du fil isolé plus ou moins fin, suivant la résistance qu'il est nécessaire de lui donner.

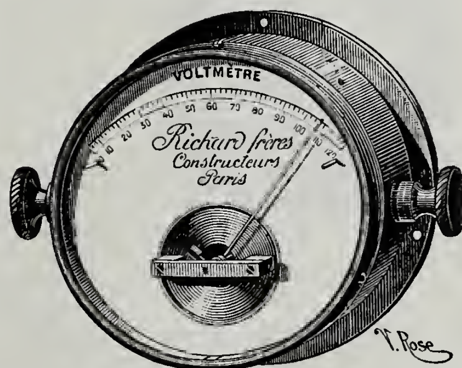


Fig. 76. — Voltmètre J. Richard.

Suivant la position de l'armature devant les pôles de l'électro-aimant, la réluctance du

circuit magnétique prend des valeurs variables. Au repos, c'est-à-dire lorsque l'index est au zéro, cette réluctance est maximum ; lorsqu'un courant traverse les bobines, l'armature tourne autour de son axe en fonction de l'intensité ou de la tension du courant. Au couple ainsi produit est opposé un couple antagoniste constitué par un poids suspendu à l'extrémité d'un petit levier; par suite, l'équipage mobile prend une position d'équilibre. Les efforts développés sont suffisamment grands pour qu'on puisse amplifier les déviations et obtenir sur le cadran divisé une étendue de 270°.

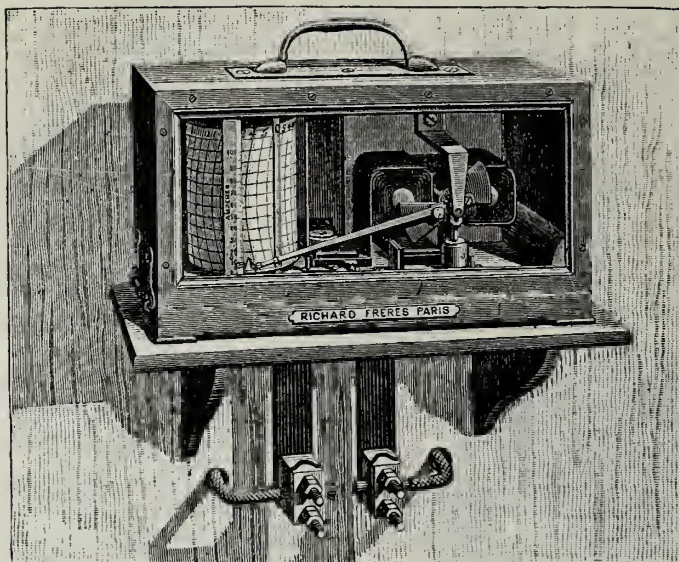



Fig. 77. — Ampèremètre enregistreur J. Richard.

Les mêmes instruments se construisent avec un dispositif enregistreur (*fig.* 77). L'armature est alors munie d'un levier dont l'extrémité porte une plume qui se déplace, suivant les variations de l'intensité ou de la tension du courant, devant un tambour effectuant une révolution complète en une heure, un jour ou une semaine, suivant les cas, et qui est garni d'une feuille de papier qui reçoit le tracé. Cette feuille peut être remplacée par une bande sans fin qu'un mouvement d'horlogerie fait défiler devant la plume avec une vitesse pouvant atteindre 3 cm par minute.




Fig. 78. — Voltmètre Hartmann et Braun.

Une échelle graduée, placée suivant l'une des génératrices du cylindre, permet de lire à chaque instant les indications données par l'instrument.

Voltmètre Hartmann et Braun. — Ces voltmètres, dont la figure 78 montre l'aspect extérieur, sont constitués par une bobine fixe à l'intérieur de laquelle sont disposées des armatures ayant la forme d'une portion de cylindre, en tôle mince, l'une fixe et l'autre mobile autour de l'axe qui porte en même temps l'aiguille indicatrice.

En découpant d'une certaine manière les armatures de tôle, on arrive à obtenir des divisions presque proportionnelles dans le voisinage de la partie utilisée de la graduation.

Un index de couleur rouge, mobile de l'extérieur, peut être amené devant la division correspondant à la tension normale.

Comme tous les instruments de cette catégorie, la graduation n'est utilisable avec les courants alternatifs que pour une fréquence déterminée.

Ampèremètre Hartmann et Braun. — Cet instrument (*fig.* 79) est construit comme le galvanomètre à ressort de Kohlrausch. Il se compose d'un tube de cuivre découpé en spirale sur le tour. Les spires ainsi constituées sont traversées par le courant à mesurer.

A l'intérieur de cette sorte de bobine est disposé un noyau de fer doux mobile susceptible d'être plus ou moins attiré. Ce noyau s'articule sur un petit levier fixé sur l'axe qui porte, en même temps, l'aiguille indicatrice.

Naturellement, comme dans tous les instruments de ce genre, les points de la graduation voisins du zéro sont très rapprochés et, par conséquent, les lectures sont peu précises.

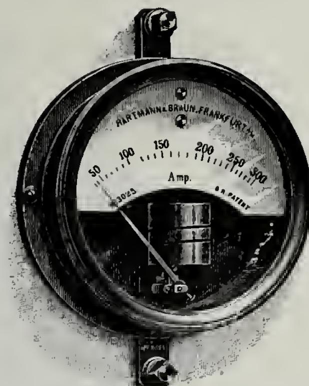


Fig. 79. — Ampèremètre Hartmann et Braun.

Ampèremètre et voltmètre Siemens et Halske. — Ces instruments, dont la figure 80 montre la vue d'ensemble, sont apériodiques et peuvent être utilisés avec les courants alternatifs comme avec les courants continus.

L'équipage mobile est constitué par une pièce de fer doux de forme particulière, soigneusement étudiée, munie d'une aiguille pouvant se déplacer devant une échelle graduée en volts ou en ampères, suivant le cas. Sous l'action du passage du courant dans la bobine fixe, la pièce de fer doux est attirée

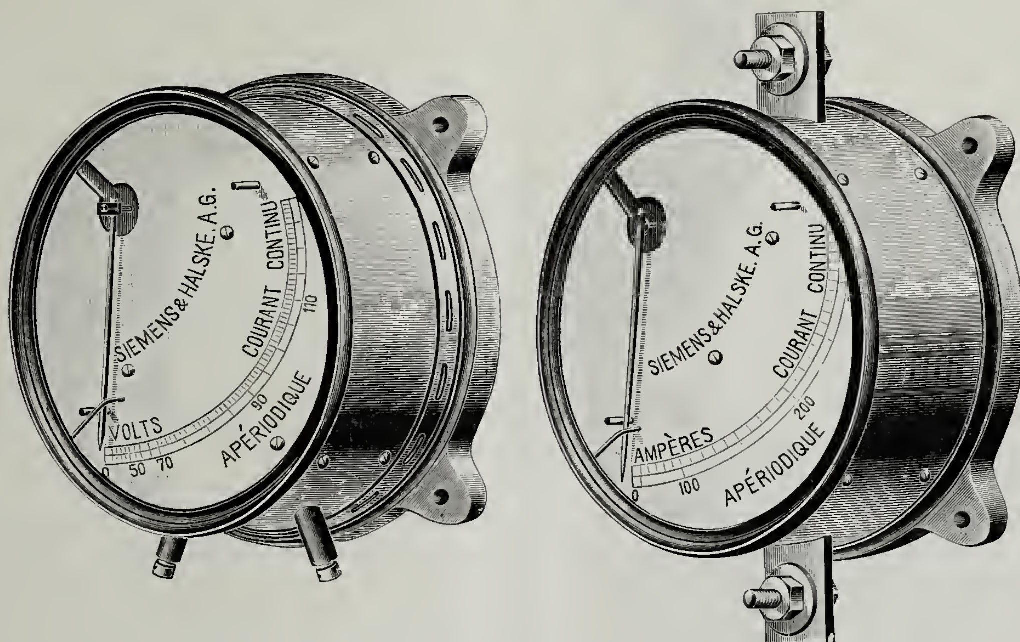


Fig. 80. — Voltmètre et ampèremètre apériodiques Siemens et Halske.

vers l'intérieur de la bobine, en sens contraire de l'action de la pesanteur qui constitue le couple antagoniste.

Ces instruments, ne comportant ni ressorts ni aimant directeur, ne sont pas susceptibles de se dérégler une fois étalonnés.

La figure 81 donne la vue intérieure de l'ampèremètre.

Le boîtier de ces instruments est en tôle de fer doux et constitue écran magnétique de protection contre l'action des champs magnétiques voisins et extérieurs.

La forme allongée de la bobine fixe permet de rapprocher beaucoup l'armature de fer doux de l'enroulement et d'obtenir ainsi une grande sensibilité, tout en diminuant le nombre de spires.

L'équipage mobile (*fig.* 82), muni d'un dispositif de réglage pour amener l'aiguille au zéro de la graduation, est monté sur un axe en acier trempé dur, pivotant dans des trous garnis de pierres fines.

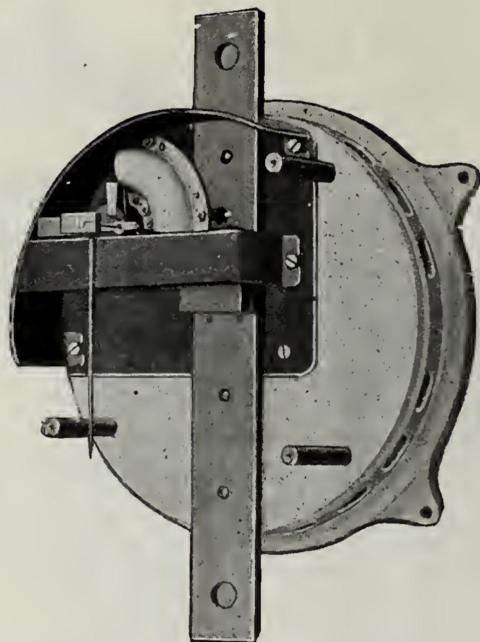


Fig. 81. — Intérieur de l'ampèremètre Siemens et Halske.



Fig. 82. — Équipage mobile des instruments Siemens et Halske.

Cet équipage est muni, en outre, d'un amortisseur à air (*fig.* 81), déjà appliqué avec succès à d'autres instruments de la même maison.

Les voltmètres et ampèremètres de ce type se construisent, si on le désire, avec double graduation : l'une pour le courant continu, l'autre pour les courants alternatifs d'une fréquence déterminée.

Voltmètre Horn. — Dans un solénoïde vertical S (*fig.* 83) passent, par le haut et par le bas, des anneaux en tôle de fer R, attachés aux bras de leviers articulés formant une sorte de balance.

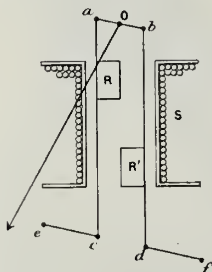



Fig. 83. — Voltmètre Horn.

Les anneaux pénètrent d'autant plus dans le solénoïde que la tension du courant est plus grande ; ces anneaux se rapprochent quand ils sont attirés et s'écartent dans le cas contraire.

Le bras *ab*, mobile autour du pivot *o*, supporte deux tiges *ac*, *bd* supportant les anneaux de fer R, R′. Ces tiges s'articulent en *cd* à deux bielles *ce*, *df* pivotant autour des points fixes *e*, *f*.

L'anneau R′ est plus lourd que l'anneau R, ce qui produit le couple résistant.

Grâce à l'importance des efforts en jeu, les effets dus aux frottements des articulations sont négligeables.

Les instruments exposés portent deux graduations. L'une, en traits noirs, est valable pour le courant continu ; l'autre, en traits rouges, est relative aux courants alternatifs de fréquence ordinaire (environ 50 périodes par seconde).

Voltmètre Breguet. — Cet instrument (*fig.* 84), qui ne peut être utilisé qu'avec le courant continu, se compose d'une armature de fer doux *f* montée sur un axe et placée dans l'alésage polaire d'un électro-aimant en fer à cheval E. Un ressort spiral *r* agit sur l'armature mobile comme force antagoniste.

Les bobines excitatrices de l'électro-aimant sont montées en dérivation sur le circuit dont on veut mesurer la tension. Elles développent dans l'entrefer un flux qui est à peu près proportionnel à la tension aux bornes.

Le couple moteur dans cet instrument est puissant, ce qui permet de le rendre presque apériodique en donnant une faible masse à l'armature de fer doux.

Cet instrument présente des effets d'hystérésis assez notables, à cause de la masse du fer de l'électro-aimant. On en corrige les effets en interrompant le courant un instant avant chaque mesure.

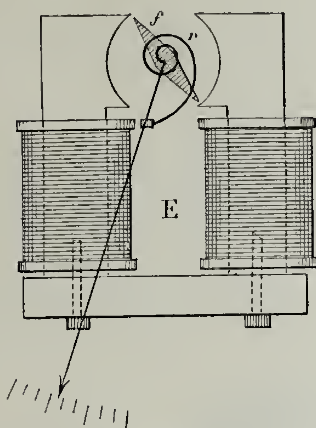



Fig. 84. — Voltmètre Breguet.

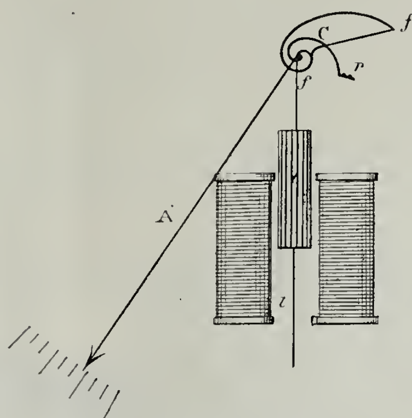



Fig. 85. — Ampèremètre Breguet.

Ampèremètre Breguet. — L'ampèremètre Breguet (*fig.* 85) est constitué par une bobine fixe, traversée par le courant à mesurer et à l'intérieur de laquelle est disposé un petit tube de fer doux très mince $t$, suspendu par un fil de soie $f$ fixé à l'extrémité $f'$ d'une came C, dans la gorge de laquelle il passe. Cette came est montée sur un axe qui porte en même temps l'aiguille indicatrice A. Un ressort spiral $r$ constitue le couple antagoniste. A sa partie inférieure, l'armature $t$ se prolonge par un petit fil de laiton $l$ qui sert à guider ses mouvements et qui traverse une platine non figurée sur le dessin.

Cet ampèremètre peut servir pour les courants continus et pour les courants alternatifs. Dans ce dernier cas, la graduation n'est exacte que si le courant à mesurer a la même fréquence et la même forme de courbe que celui qui a servi à l'étalonner.

Ampèremètre lord Kelvin. — Cet instrument (*fig.* 86), connu sous le nom anglais d'*ampère gauge*, est l'instrument le plus précis de tous les ampèremètres électromagnétiques.

La bobine fixe, de forme spéciale, est disposée sur le haut de la cage vitrée renfermant l'équipage mobile. Cette bobine est constituée par des tubes concentriques de cuivre, découpés en hélices de sens alterné, ou des disques de même métal isolés entre eux par interposition de mica.

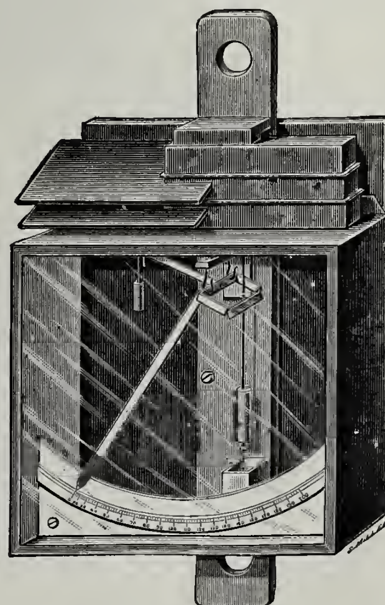


Fig. 86. — Ampèremètre lord Kelvin.

L'armature mobile est formée par un mince fil de fer doux. Au repos, cette armature est maintenue par l'action de la pesanteur, grâce à un contrepoids suspendu à un fil et visible sur la droite de la figure; lorsqu'un courant traverse la bobine, le fil est attiré et entraîne avec lui l'aiguille indicatrice. L'instrument est rendu apério-

dique par un système amortisseur consistant en un petit disque immergé dans l'huile et fixé à la partie inférieure du contrepoids. L'ensemble de l'équipage mobile est porté par une suspension à couteau.

Les conducteurs amenant le courant se fixent ou se soudent sur les barres métalliques qui émergent de la boîte en haut et en bas et qui servent en même temps à fixer l'instrument verticalement. Une plaque en matière isolante est montée sur la face verticale postérieure de la boîte.

Les premiers modèles de cet instrument présentaient l'inconvénient de ne pas être apériodiques; les modèles actuels ne le présentent plus et sont, en outre, disposés pour être à l'abri des influences des champs magnétiques extérieurs d'intensité moyenne.

Gradués spécialement, ils conviennent pour la mesure des courants alternatifs.

On peut également les utiliser sur les circuits à haute tension, à cause du soin apporté à leur isolement; l'ensemble de l'instrument est monté sur marbre.

**Instruments à bobine mobile et à aimant fixe.** — Ces instruments sont aujourd'hui les plus répandus dans les installations à courant continu ; aussi de nombreux modèles figuraient à l'Exposition.

Voltmètre Carpentier. — Le voltmètre Carpentier (*fig.* 87) comporte un aimant fixe de forme presque circulaire, dont les extrémités sont prises entre deux brides faisant corps avec

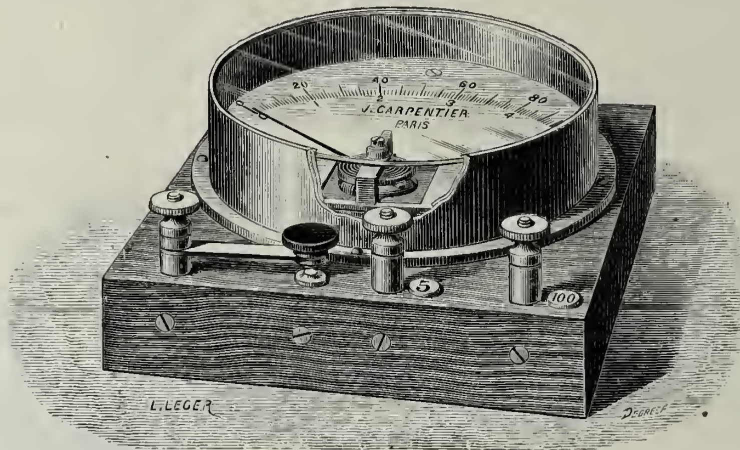



Fig. 87. — Voltmètre de précision Carpentier.

des pièces polaires en fer doux entre lesquelles est placée la bobine mobile. Ces pièces polaires sont solidement assemblées à l'aide de deux barrettes de laiton qui supportent en même temps le noyau central en fer doux du cadre mobile, noyau qui est fixe, et deux ponts munis de vis garnies de rubis qui servent à la suspension entre pivots de l'équipage mobile.

La bobine mobile est formée d'un cadre en cuivre rouge, à bords relevés, qui sert d'amortisseur et sur lequel est enroulé le fil isolé. Des ressorts spiraux, en bronze phosphoreux, sont fixés au centre de la bobine fixée verticalement sur son axe; l'extrémité libre d'un de ces ressorts est fixe et maintenue dans sa position par une goupille isolée, tandis que l'extrémité libre de l'autre ressort est solidaire d'une pièce mobile permettant de régler la position initiale de l'équipage.

L'index que porte le cadre mobile est une aiguille très mince en aluminium qui se déplace devant un cadran gradué.

Ces voltmètres ont une résistance très élevée (15 000 ohms pour les voltmètres de 120 volts); par suite, ils n'absorbent que très peu d'énergie pour leur fonctionnement. Malgré cela, on ne doit pas les laisser constamment en circuit afin d'éviter tout échauffement; à cet

effet, chaque voltmètre est muni d'une clé de contact que l'on est dans l'obligation d'abaisser toutes les fois que l'on veut mettre l'instrument en service.

La résistance est répartie en deux bobines inégales dont l'une, la plus faible, a une de ses extrémités reliée à la borne placée sur la clé de contact, tandis que l'autre extrémité aboutit à une borne intermédiaire, marquée 5 sur la figure 87 ; la résistance totale, comprenant les deux bobines montées en série, est reliée, d'une part, à la borne placée sur la clé et, d'autre part, à la troisième borne marquée 100.

L'échelle porte, par suite, deux graduations et l'instrument peut servir pour mesurer, par exemple, des tensions comprises entre 1 et 5 volts ou entre 1 et 100 volts, suivant que l'un des conducteurs extérieurs est rattaché à la borne 5 ou à la borne 100. Sur la graduation inférieure, chaque division correspond à $\frac{1}{20}$ de volt et sur l'échelle supérieure chaque division vaut 1 volt.

Ces voltmètres se construisent également en plusieurs dimensions et sans socle pour être placés sur les tableaux de distribution.

Voltmètre Weston. — La Weston Electrical Instrument Company, de Newark (États-Unis), n'avait exposé qu'un voltmètre de précision.

Cet instrument, bien connu de tous les électriciens (*fig.* 88), a une bobine mobile enroulée sur un cadre en cuivre servant d'amortisseur. Cette bobine est montée sur pivots entre les pôles d'un aimant puissant ; un noyau de fer doux sert à uniformiser le flux dans l'entrefer et à rendre ainsi les divisions de la graduation égales.

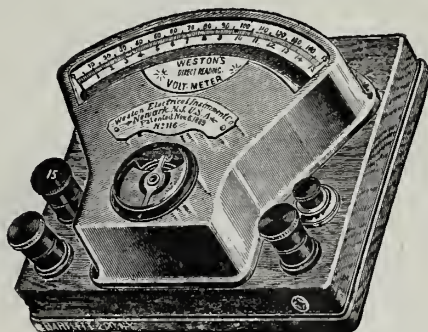


Fig. 88. — Voltmètre Weston.

La résistance placée en série avec la bobine mobile est en fil de maillechort et sa résistance est très grande par rapport à celle de la bobine mobile. Dans ces conditions, les indications fournies par le voltmètre sont pratiquement indépendantes des variations de la température. Toutefois, lorsqu'on veut en tenir compte, il suffit de consulter un thermomètre faisant corps avec l'instrument et de se reporter à une table de correction qui l'accompagne. Afin d'éviter les erreurs de parallaxe, le cadran porte un miroir et, lorsqu'on fait une lecture, il suffit que l'aiguille et son image soient superposées pour apprécier exactement la déviation.

Les instruments de cette maison sont universellement réputés pour la constance des indications qu'ils fournissent, résultat qui provient d'un traitement particulier que subit l'aimant et qui a pour effet de lui assurer une aimantation invariable avec le temps.

Ampèremètres et voltmètres Chauvin et Arnoux. — Le cadre galvanométrique mobile est constitué par une petite couronne de fil de cuivre recouvert de soie (*fig.* 89). Cette couronne est sertie entre deux bagues concentriques de cuivre pur, découpées dans du tube sans soudure. Les deux extrémités du fil sont respectivement reliées par une soudure à chacune de ces bagues qui n'ont pas seulement pour objet de donner au cadre galvanométrique une rigidité qu'il ne pourrait posséder sans cela, mais aussi de servir d'amortisseur électromagnétique très énergique.

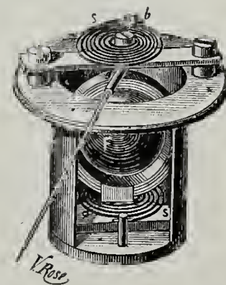


Fig. 89. — Détails du cadre mobile des instruments Chauvin et Arnoux.

Le cadre mobile ainsi constitué est muni, suivant un de ses diamètres, de deux petits pivots en acier pénétrant dans deux crapaudines en pierre fine qui réduisent les frottements au minimum et isolent le cadre électriquement. Deux ressorts spiraux $s$, $s'$, en bronze phosphoreux, servent de conducteurs au courant et développent en même temps le couple antagoniste qui doit faire équilibre au couple électromagnétique développé par l'aimant fixe sur le cadre, quand ce dernier est par-

couru par un courant. Ces deux ressorts spiraux agissent en opposition afin d'assurer la fixité du zéro de l'aiguille indicatrice; celle-ci est en aluminium pour réduire au minimum le moment d'inertie de l'équipage mobile.

Cet équipage, parfaitement équilibré, est renfermé dans un tube à embase qui s'engage entre les pôles de l'aimant A en forme d'anneau ou de tore (*fig.* 90); ce tube est muni à ses deux extrémités d'une traverse sur le milieu de laquelle est fixée la chape d'une des deux crapaudines supportant les extrémités de l'axe de l'équipage mobile.

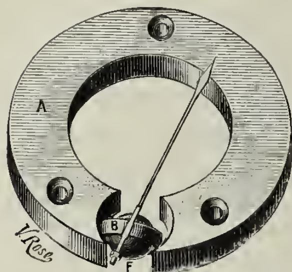


Fig. 90. — Aimant des instruments Chauvin et Arnoux à cadre mobile.

A l'intérieur du cadre galvanométrique est centrée et fixée une bille d'acier F qui diminue la réluctance du circuit magnétique de l'aimant.

Dans les ampèremètres (*fig.* 91), le circuit du cadre galvanométrique a une résistance moyenne de 0,5 ohm et un courant d'une intensité de 0,05 ampère suffit pour donner à l'équipage mobile une déviation égale à la totalité de l'échelle.

Afin de pouvoir mesurer des courants d'intensité supérieure à 0,05 ampère, on place le circuit du cadre mobile en dérivation aux extrémités d'un shunt approprié à l'intensité du courant à mesurer (*fig.* 92). Ces shunts sont constitués par des feuilles de maillechort de 1 mm d'épaisseur, soigneusement soudées par leurs extrémités à deux blocs de cuivre munis de mâchoires auxquelles se fixent les conducteurs du circuit extérieur. La liaison entre l'ampèremètre et le shunt s'établit à l'aide de deux fils souples, de 1 m de longueur environ, dont les extrémités sont munies d'une broche conique que l'on fixe, d'un côté dans un trou réservé, à cet effet, à l'extrémité du shunt, de l'autre dans une des bornes de l'instrument. Dans ces conditions, il est impossible de se servir de conducteurs autres que ces fils souples dont l'emploi est indispensable pour effectuer les mesures avec exactitude, car leur résistance a été calculée en conséquence.

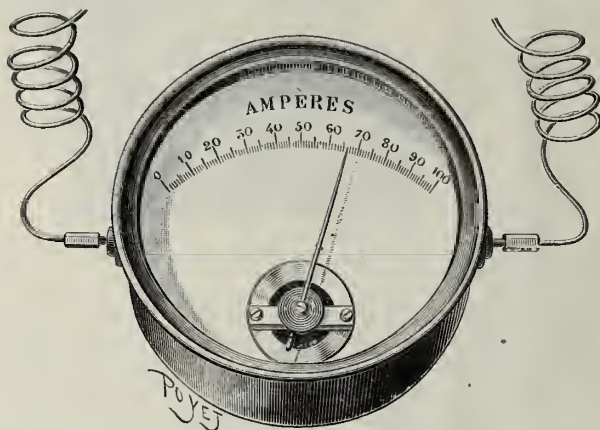


Fig. 91. — Ampèremètre Chauvin et Arnoux à cadre mobile.

L'emploi de shunts séparés présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul ampèremètre pour effectuer des mesures d'intensités très différentes. Après étalonnage, chaque shunt est muni d'une plaque portant l'indication de la valeur maximum en ampères pour laquelle il a été établi et de sa résistance exprimée en microhms.



Fig. 92. — Shunt d'ampèremètre Chauvin et Arnoux à cadre mobile.

Le voltmètre ne diffère de l'ampèremètre que par la résistance donnée à l'enroulement du cadre mobile qui a toujours une valeur de 75 ohms et par l'addition de résistances disposées en série à la suite du cadre et dont la valeur est appropriée à la différence de potentiel maximum que doit mesurer l'instrument.

Un courant de 5 milliampères dans la bobine mobile suffit pour imprimer à l'aiguille indicatrice une déviation égale à la totalité de l'échelle graduée. Comme la résistance de l'enroulement du cadre mobile n'est qu'une petite fraction de la résistance totale, on conçoit que les indications de l'instrument soient pratiquement indépendantes des variations de la température.

Dans les instruments Chauvin et Arnoux, le conducteur positif s'attache à la borne de gauche et le négatif à la borne de droite.

La faible intensité de courant qu'exigent ces voltmètres pour leur fonctionnement ainsi que la petite résistance donnée au cadre galvanométrique ont permis d'utiliser le même instrument pour mesurer des tensions très différentes. A cet effet, l'instrument est muni, sur le pour-

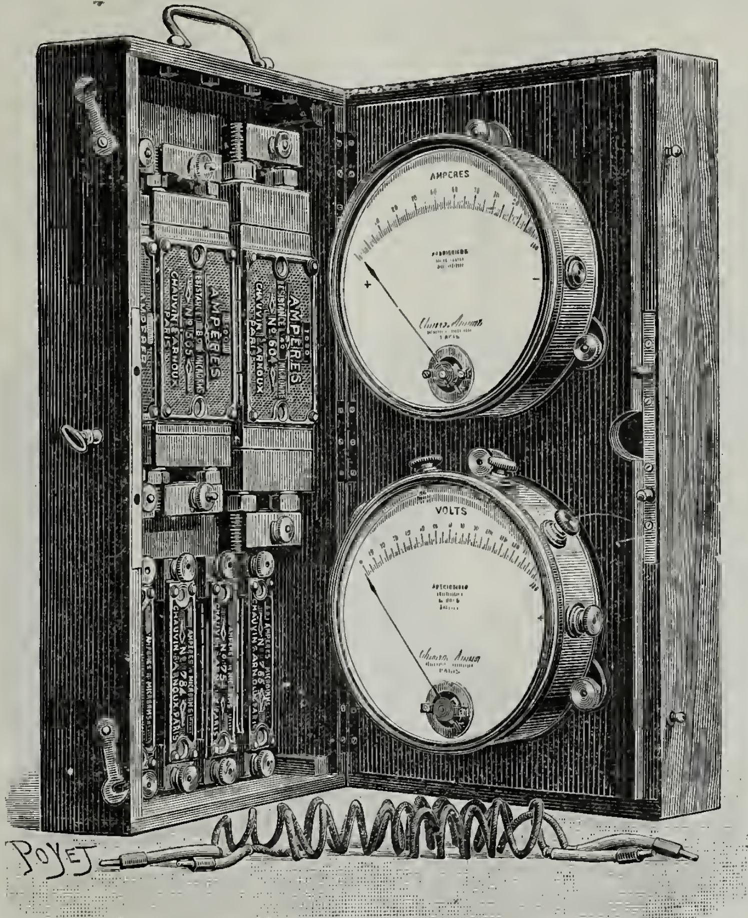



Fig. 93. — Caisse de contrôle Chauvin et Arnoux.

tour de son boîtier, de plusieurs bornes correspondant à diverses résistances additionnelles. La borne de gauche, marquée O, est commune aux divers circuits ; la borne de droite correspond à la tension la plus élevée que peut mesurer l'instrument et les bornes intermédiaires à des tensions dont la valeur va en diminuant à mesure que l'on s'avance vers la gauche.

Sous le nom de caisse de contrôle, les constructeurs ont réuni dans une boîte un voltmètre et un ampèremètre avec ses shunts (*fig.* 93).

Le voltmètre a une graduation de 150 divisions et peut être utilisé avec cinq sensibilités différentes pour chacune desquelles on obtient le maximum de la déviation.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1er circuit, | — | 3 volts | — chaque division | correspond à | 0,02 | volt. |
| 2e | — | 30 | — | — | 0,2 | — |
| 3e | — | 150 | — | — | 1 | — |
| 4e | — | 300 | — | — | 2 | volts |
| 5e | — | 600 | — | — | 4 | — |

L'instrument est muni d'un bouton commandant un interrupteur-inverseur. Lorsque l'aiguille tend à dévier en sens inverse de la graduation, il suffit de pousser le bouton à droite ou à gauche, suivant le cas, pour inverser les communications. Lorsque le bouton est arrêté au milieu de sa course, le circuit se trouve interrompu.

L'ampèremètre a un cadran comportant 100 divisions et est accompagné de sept shunts qui permettent d'obtenir le maximum de déviation pour chacune des valeurs suivantes :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ampère, | soit | 0,01 | ampère | par division. |
| 6 | ampères | — | 0,05 | — | — |
| 10 | — | — | 0,1 | — | — |
| 50 | — | — | 0,5 | — | — |
| 100 | — | — | 1 | — | — |
| 500 | — | — | 5 | ampères | — |
| 1 000 | — | — | 10 | — | — |

Les mêmes constructeurs ont également exposé un instrument composé d'un voltmètre et d'un ampèremètre de construction identique à ceux qui viennent d'être décrits et destinés spécialement aux voitures automobiles électriques (*fig.* 94).

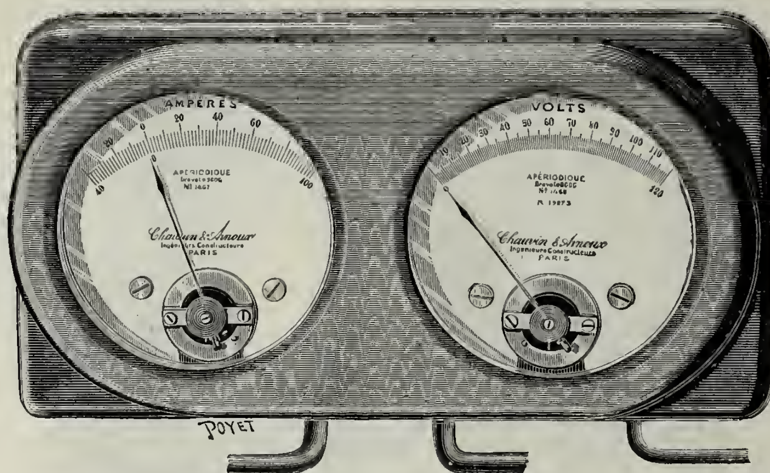



Fig. 94. — Voltmètre et ampèremètre Chauvin et Arnoux pour automobiles électriques.

Les deux instruments sont renfermés dans une boîte en noyer, parfaitement étanche Trois câbles sortent de cette boîte ; deux sont reliés à l'ampèremètre et le troisième au voltmètre.

La graduation de l'ampèremètre est établie, si on le désire, pour indiquer la récupération de courant lorsque le moteur de la voiture fonctionne comme génératrice, lors de la descente d'une rampe. Dans ces conditions, l'instrument peut mesurer 25 ampères à gauche du zéro et 100 ampères à droite.

Le voltmètre peut également être étalonné pour que sa graduation soit utilisée pour le dernier tiers de la force électromotrice totale que peut mesurer l'instrument. Ainsi, au lieu d'indiquer de 0 à 120 volts, on peut le graduer de 80 à 120 volts ou de 100 à 150 volts.

L'ampèremètre et le voltmètre enregistreurs Chauvin et Arnoux (*fig.* 95) sont basés sur le même principe que les instruments qui viennent d'être décrits.

L'aimant est constitué par une seule pièce d'acier au tungstène sans pièces polaires rapportées.

Le cadre galvanométrique est formé d'un cadre de cuivre rouge, servant d'amortisseur élec-

tromagnétique, sur lequel est enroulé du fil de cuivre recouvert de soie. Ce cadre, monté sur pivots entre deux pointes engagées dans des crapaudines en pierre fine, oscille autour d'un cylindre de fer doux qui a pour objet de diminuer la réluctance du circuit magnétique constitué par l'aimant permanent.

Le courant est amené au cadre mobile par deux ressorts spiraux.

Malgré la faible valeur de la puissance électrique dépensée dans ce cadre, valeur qui ne dépasse pas 0,2 watt pour une déviation maximum de 36°, les forces en jeu sont suffisantes pour assurer l'inscription du diagramme avec un tracé donnant rigoureusement toutes les variations, grâce à la substitution à la plume ordinaire d'une plume-molette n'entravant pas d'une façon appréciable les mouvements du cadre mobile. Cette plume-molette trace un trait très délié sur le papier par *roulement* et non par *frottement* et permet de donner à l'instrument une très grande sensibilité.

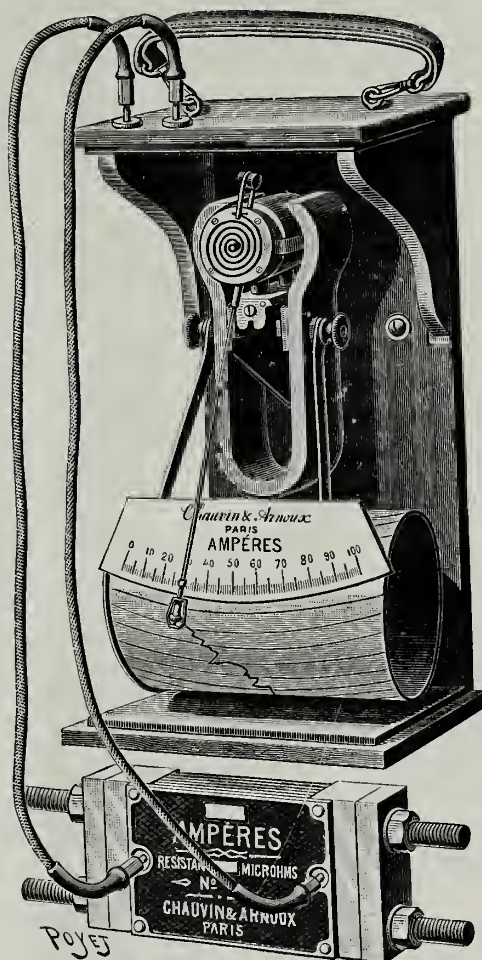



Fig. 95. — Ampèremètre enregistreur Chauvin et Arnoux.

Deux bras articulés sur l'aimant portent un secteur gradué dont les divisions servent à repérer la position de l'aiguille porte-plume en l'absence de papier sur le cylindre enregistreur. Ce secteur gradué permet également de se servir de l'instrument comme d'un voltmètre ou d'un ampèremètre ordinaire. Il suffit de relever ce cadran divisé pour écarter la plume du cylindre lorsqu'on veut transporter l'instrument ou placer le papier divisé destiné à recevoir le diagramme.

Un petit curseur placé sur l'aiguille permet de régler sa position avec une très grande exactitude.

Le mouvement d'horlogerie, ordinairement employé pour actionner le cylindre enregistreur, effectue un tour en vingt-quatre heures et est muni d'un échappement ordinaire à cylindre. Dans les instruments à déroulement rapide, cet échappement est remplacé par un régulateur électromagnétique. Le remplacement du papier sur le cylindre s'effectue avec la plus grande facilité grâce à un dispositif spécial. Les feuilles de papier employées sont divisées et chiffrées en heures dans le sens de leur plus grande longueur et en cinquante divisions égales, par groupes de cinq divisions, dans le sens perpendiculaire. Ces dernières divisions ne portent pas de chiffres, car l'enregistreur pouvant être employé avec des sensibilités différentes, il est toujours facile de porter ces chiffres après coup et suivant la sensibilité avec laquelle doit être obtenu le diagramme enregistré. La réalisation d'un dispositif galvanométrique comportant une graduation en divisions égales présente cet avantage que les diagrammes peuvent être intégrés à l'aide d'un planimètre, bien qu'ils soient rapportés à un système de coordonnées rectilignes et curvilignes, la courbure des ordonnées curvilignes étant telle que les surfaces des différents petits parallélogrammes, à côtés rectilignes et curvilignes deux à deux, ne diffèrent au maximum que de $\frac{1}{200}$, c'est-à-dire d'une quantité inférieure aux erreurs qu'on peut commettre d'autre part.

Les ampèremètres enregistreurs sont pourvus de shunts interchangeables établis pour les différentes valeurs maxima à mesurer et qu'il suffit de substituer l'un à l'autre pour faire varier la sensibilité de l'instrument dans le rapport voulu. Ces shunts se relient à l'enregistreur par des fils souples; la série complète comprend douze de ces shunts, correspondant aux intensités maxima de 1; 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 250; 500; 1 000; 2 500 et 5 000 ampères.

Les déviations de l'instrument étant proportionnelles à l'intensité du courant, le zéro de la graduation peut être placé, par un simple décalage du piton du spiral antérieur, en un point quelconque de l'échelle des ordonnées du diagramme sans qu'il soit nécessaire de procéder à un nouvel étalonnage. On peut ainsi enregistrer simultanément le sens et l'intensité d'un courant, cas qui se présente notamment lorsqu'on veut utiliser l'instrument pour enregistrer la charge et la décharge d'une batterie d'accumulateur.

Ampèremètre et voltmètre de la Compagnie générale d'électricité de Creil (anciens établissements Daydé et Pillé). — Dans ces instruments, le cadre mobile est monté sur pivots et des spiraux en bronze phosphoreux servent pour amener le courant et produisent en même temps le couple antagoniste.

Dans les voltmètres, la résistance additionnelle est logée dans le boîtier entre les branches de l'aimant. Cette résistance peut être fractionnée lorsque le voltmètre est établi pour plusieurs sensibilités.

Dans les ampèremètres, le cadre mobile est dérivé aux bornes d'un shunt. Ces shunts ont tous la même résistance lorsqu'ils s'appliquent à des instruments pouvant mesurer la même intensité maximum; ils sont, par conséquent, interchangeables, l'étalonnage de l'ampèremètre s'effectuant en agissant sur une petite résistance supplémentaire montée en série avec le cadre mobile.

Ampèremètres et voltmètres du laboratoire Volta. — La maison Gaiffe a construit ces instruments, imaginés et étudiés par MM. Abdank-Abakanowicz et Meylan.

Dans les instruments de précision, dont la figure 96 montre la disposition schématique, on a cherché à rendre la bobine mobile facilement amovible. A cet effet, elle est disposée de manière à pouvoir être enlevée sans qu'il soit nécessaire de démonter le noyau de fer doux *aa*, qui sert à diminuer la réluctance du circuit magnétique de l'aimant fixe NS.

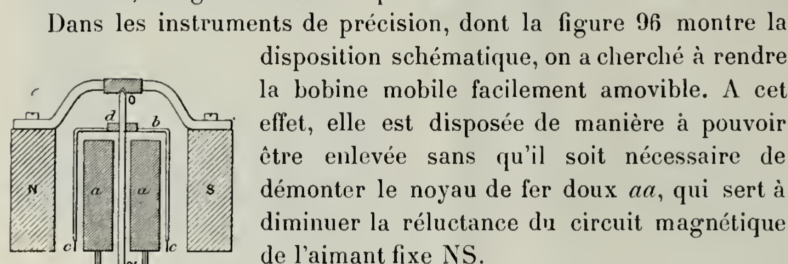



Fig. 96. — Coupe du voltmètre de précision du laboratoire Volta.

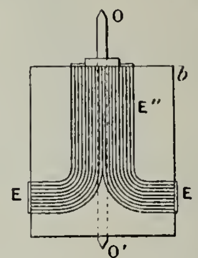



Fig. 97. — Détails de construction de la bobine mobile du voltmètre de précision du laboratoire Volta.

La bobine mobile *b* est enroulée et collée à la gomme-laque sur une cloche cylindrique *c* en aluminium, fixée en *d* sur l'axe OO' qui pivote dans des crapaudines en pierre fine.

Comme on le voit sur la figure 97, les fils de la bobine descendent verticalement suivant deux génératrices diamétrales E'' et, à la partie inférieure de la cloche en aluminium, se recourbent en EE' pour suivre la courbure de cette dernière.

Dans ces conditions, la cloche peut coiffer le noyau de fer doux *aa* sans que la bobine mobile y fasse obstacle.

Pour éviter toutes déformations de la graduation, les divisions sont gravées sur un cadran métallique.

Dans ce type d'instruments, comme dans tous les instruments du même genre, la bobine mobile agit sur l'aimant, tout comme un induit de dynamo, en produisant une réaction électromagnétique; les ampères-tours démagnétisants du cadre tendent à faire perdre à l'aimant permanent une partie de son moment magnétique. Par suite de l'affaiblissement de l'aimant, c'est-à-dire à cause de la diminution d'un des facteurs du couple produisant la déviation, l'instrument donne des indications plus faibles qu'elles ne le sont réellement.

Afin d'éviter cet inconvénient, peu sensible dans les voltmètres, mais beaucoup plus fréquent dans les ampèremètres des stations centrales qui subissent de fortes et fréquentes

variations de charge, et dans ceux des usines de tramways exposés à des courts-circuits, les inventeurs ont imaginé un second type d'instruments, dans lequel la cause de déréglage signalée est évitée en disposant l'aimant de manière qu'un seul côté du cadre mobile agisse pour produire le couple déviant.

L'aimant a ses deux branches NN′ et SS′ repliées suivant une courbure dont l'axe de la bobine mobile, projeté en O, constitue le centre (*fig* 98). Le côté *a* de la bobine mobile *aa′* se déplace seul dans l'entrefer, qui a une largeur de 2,5 mm, largeur que l'on peut modifier et régler à l'aide d'une pièce polaire mobile *b*, en fer doux.

Le couple déviant est, par suite, réduit de moitié, toutes choses égales d'ailleurs ; mais, par contre, la réaction due au cadre mobile tend plutôt, sinon à augmenter, du moins à maintenir constante l'aimantation de l'aimant fixe.

Le noyau de fer doux, placé d'ordinaire à l'intérieur de la bobine mobile, se trouve naturellement supprimé dans ce modèle d'instrument. Le champ dans l'entrefer a une valeur de 1 300 gauss ; l'apériodicité se trouve très peu diminuée.

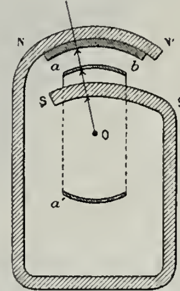


Fig. 98. — Ampèremètre à cadre mobile non démagnétisant du laboratoire Volta.

Pour la vérification des instruments placés sur les tableaux de distribution, le laboratoire Volta a réalisé un type de voltmètre et d'ampèremètre de construction analogue et à trois sensibilités. L'ampèremètre est muni, à cet effet, de trois shunts permettant de mesurer de 0 à 3, de 0 à 30 et de 0 à 300 ampères ; dans le voltmètre, les résistances additionnelles sont calculées pour pouvoir mesurer de 0 à 3, de 0 à 150 et de 0 à 750 volts. Les fiches amenant le circuit aux différents shunts ou résistances sont de grosseur différente afin d'éviter toute erreur.

Ces instruments sont aussi construits avec système enregistreur. Dans ce cas, les dimensions de l'aimant sont plus grandes, afin d'obtenir un couple déviant atteignant 20 grammes-centimètres ; ce couple puissant peut vaincre facilement les frottements de la plume sur le papier.

Le système enregistreur comporte une seconde plume fixe qui trace la ligne des zéros, afin de prévenir les erreurs dues au papier mal placé et sur lequel la ligne de repère est tracée d'avance.

Un dispositif spécial permet d'utiliser ces appareils enregistreurs sur les locomotives électriques et sur les voitures de tramways. Ce dispositif consiste en un cadre ou châssis en bois que l'on fixe directement aux parois de l'abri de la locomotive ou sur un panneau de la voiture automotrice.

L'instrument est placé au milieu du châssis et des tampons élastiques en caoutchouc, disposés suivant trois plans perpendiculaires, amortissent suffisamment les oscillations dues aux trépidations. L'instrument est ainsi maintenu de haut en bas, de gauche à droite et d'avant en arrière.

Le caoutchouc présente l'avantage sur les ressorts d'offrir une élasticité considérable, tout en n'ayant qu'une faible inertie propre.

Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. — Cette Société exposait plusieurs modèles de voltmètres et d'ampèremètres à bobine mobile. La figure 99 montre l'aspect extérieur d'un millivoltmètre de précision et la figure 100 celui d'un ampèremètre pour tableau de distribution.

Dans les voltmètres, on cherche à rendre pratiquement négligeables les corrections nécessitées par les variations de température en bobinant le cadre mobile avec du fil de cuivre et en établissant la résistance additionnelle en maillechort ou en autre métal de résistivité constante avec la température dans les limites de la pratique. La résistance du cadre mobile étant excessivement faible par rapport à celle de la résistance additionnelle, la résistance totale ne varie que d'une façon négligeable. On peut, du reste, tenir compte des variations de la

température en faisant subir aux lectures une correction ; dans ce cas, l'instrument est muni d'un thermomètre (*fig.* 99) et est accompagné d'une table de correction.

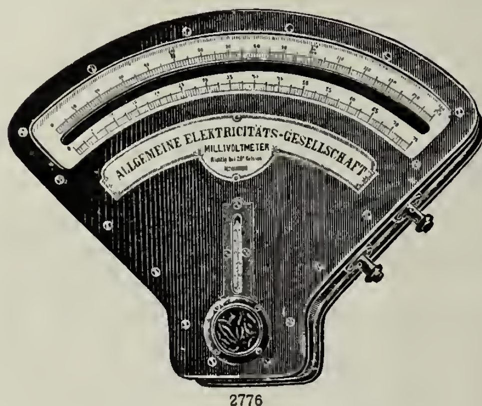



Fig. 99. — Millivoltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.




Fig. 100. — Ampèremètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Ampèremètre et voltmètre Hartmann et Braun. — Ces instruments (*fig.* 101) ont été spécialement étudiés pour les tableaux de distribution.

Le boîtier est en fonte et le couvercle ne laisse visibles que la graduation et l'extrémité de l'aiguille indicatrice.




Fig. 101. — Ampèremètre à bobine mobile Hartmann et Braun.

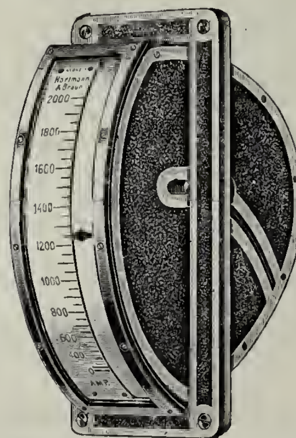



Fig. 102. — Ampèremètre à bobile mobile Hartmann et Braun avec graduation sur le côté.

Ce boîtier en fonte, dont l'épaisseur est assez forte, a pour objet de mettre l'instrument à l'abri des perturbations causées par le voisinage de champs magnétiques très puissants. Dans ces conditions, ces instruments peuvent être utilisés à proximité de dynamos en charge.

Un autre modèle des mêmes constructeurs (*fig.* 102) est disposé pour occuper le moins de largeur possible sur les tableaux de distribution. Le boîtier est monté à charnière et peut pivoter dans un cadre autour du petit côté inférieur de ce cadre. On peut ainsi régler l'inclinaison de l'instrument pour rendre toujours facile l'observation de l'aiguille.

Ampèremètres et voltmètres Siemens et Halske. — Indépendamment de plusieurs modèles d'ampèremètres et de voltmètres de précision à cadre mobile, de construction analogue à ceux décrits précédemment, la Société Siemens et Halske exposait un millivoltmètre et milliampèremètre de précision, en un seul instrument (*fig.* 103), dont la bobine mobile a 1 ohm de résistance, avec échelle absolument proportionnelle de 150 divisions et presque apériodique.

Cet instrument permet de mesurer directement des intensités de 0 à 0,15 ampère et des tensions de 0 à 0,15 volt.

Il comporte un certain nombre d'accessoires permettant d'effectuer les mesures dans des limites plus étendues et qui sont les suivantes :

1° Boîte de résistances en manganin de 9,99 et 999 ohms pour mesurer des tensions allant jusqu'à 1,5, 15 et 150 volts (*fig.* 104);




Fig. 103.
Millivoltmètre et milliampèremètre Siemens et Halske.

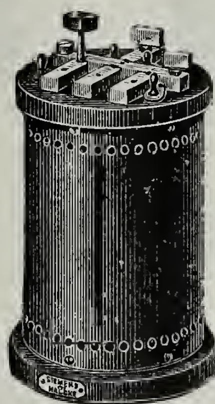


Fig. 104.
Boîte de résistances pour millivoltmètre Siemens et Halske.

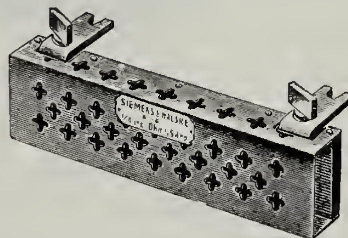


Fig. 105.
Shunt pour milliampèremètre Siemens et Halske.

2° Boîte de résistances en manganin de 9,99, 999 et 1 999 ohms pour tensions jusqu'à 1,5, 15, 150 et 300 volts;

3° Boîte de résistances en manganin de 9,99, 999 et 4 999 ohms, pour tensions jusqu'à 1,5, 15, 150 et 750 volts;

4° Boîte de résistances en manganin de 9,99, 999 et 9 999 ohms pour tensions jusqu'à 1,5, 15, 150 et 1 500 volts;

5° Des shunts de 1/9 ohm de résistance, pour mesurer des intensités allant jusqu'à 1,5 ampère (*fig.* 105);

6° Enfin une série de shunts de 1/19, 1/49, 1/99, 1/199, 1/499, 1/999, 1/1 999 et 1/4 999 pour mesurer des intensités allant respectivement jusqu'à 3, 7,5, 15, 30, 75, 150, 300 et 750 ampères.

Le même instrument se construit aussi avec un dispositif enregistreur mû par l'électricité.

D'autres modèles d'ampèremètres et de voltmètres de précision à plusieurs sensibilités, pour laboratoires, ainsi que des modèles de poche, étaient exposés par la même Société.

Voltmètres de précision lord Kelvin. — Ces instruments (*fig.* 106) à aimant fixe et à cadre mobile, présentent cette particularité qu'avant d'être étalonnés l'aimant subit une préparation spéciale qui rend les indications invariables, même longtemps après l'étalonnage. Le constructeur, M. James White, de Glasgow, établit deux modèles de ces voltmètres : l'un à cadran sur la face antérieure; l'autre à cadran sur le côté (*fig.* 107).

Ces voltmètres ont leur bobine mobile suspendue par des ressorts spiraux qui lui amènent le courant et produisent en même temps le couple antagoniste. Les pivots sont ainsi complètement supprimés, ce qui présente l'avantage d'éviter les frottements qui en résultent et aussi toute cause de dérangement due à des pivots faussés. Malgré l'absence de pivots, le centrage de la bobine mobile est néanmoins parfaitement assuré.

Lorsque l'aiguille est au zéro, elle vient buter contre un ressort très flexible (*fig.* 106) ; grâce à cette disposition, l'aiguille se trouve suffisamment bloquée, lorsqu'on transporte l'instrument,



Fig. 106. — Voltmètre de précision lord Kelvin, modèle ordinaire.



Fig. 107. — Voltmètre de précision lord Kelvin, modèle avec graduation sur le côté.

le ressort empêchant l'aiguille d'aller vers la gauche et la torsion des spiraux limitant son déplacement vers la droite.

Ampèremètre et voltmètre Caron. — Ces instruments, construits et exposés par la Société industrielle des Téléphones, diffèrent des instruments analogues à bobine mobile par la substitution d'un électro-aimant à l'aimant fixe, dispositif qui a pour objet de permettre d'utiliser les instruments genre Deprez-d'Arsonval pour la mesure des courants alternatifs.

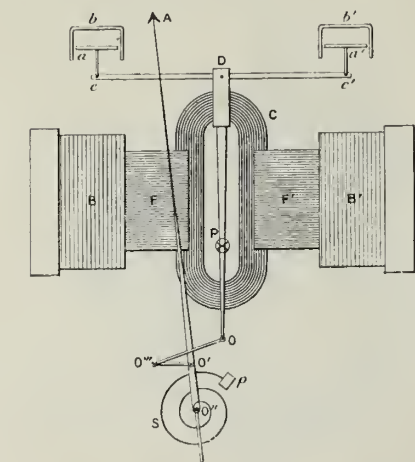



Fig. 108 et 109. — Détails de construction de l'ampèremètre Caron.

Comme on le voit sur la figure 108, l'instrument se compose de deux électro-aimants en fer à cheval F, F', dont le noyau est en tôles minces et isolées entre elles et dont les bobines B, B' sont traversées par le courant à mesurer.

Entre les pièces polaires se meut, parallèlement à son plan, un cadre très plat C en fil fin, supporté par une chape en aluminium mobile autour de l'axe D. Cette chape est munie, à sa partie inférieure, d'une tige DO, le long de laquelle peut se déplacer le contrepoids P.

Le courant, traversant les bobines et le cadre, tend à faire dévier ce dernier ; la pointe O peut ainsi décrire un arc de cercle autour de l'axe D.

Le champ étant très sensiblement uniforme dans l'entrefer des électro-aimants, la déviation de la bobine est proportionnelle à l'intensité du courant dans les ampèremètres, à la différence de potentiel appliquée dans les voltmètres.

Le déplacement de la pointe O est amplifié au moyen de deux bielles OO''', O'''O', l'articulation O' s'effectuant sur l'aiguille indicatrice AO''. Un petit ressort spiral S sert à fixer le zéro de l'instrument et à annuler l'effet des temps perdus dans les articulations des bielles.

Ces instruments sont rendus sensiblement apériodiques par l'emploi d'amortisseurs à air, constitués par des cloches $b$, $b'$, dans lesquelles se déplacent sans frottement les pistons $a$, $a'$, fixés d'une manière rigide sur la tige DO par l'intermédiaire d'une traverse $cc'$.

Le réglage de l'instrument s'effectue en déplaçant convenablement le contrepoids P. Il est nécessaire que l'instrument soit fixé dans une position parfaitement verticale et, pour mettre l'aiguille au zéro, on agit sur le piton $p$ du ressort spiral en manœuvrant des vis de rappel placées en dehors du boîtier.

Le voltmètre ne diffère de l'ampèremètre que par la résistance donnée aux bobines ; les bobines de l'électro-aimant et la bobine mobile sont reliées en série.

L'enroulement des bobines de l'électro-aimant des voltmètres est fait en fil de maillechort afin de donner la prépondérance au facteur *résistance ohmique* dans le terme *impédance* de l'enroulement. Le décalage entre la tension et l'intensité du courant est ainsi réduit autant qu'il est possible et les indications de l'instrument sont sensiblement indépendantes de la fréquence.

En plaçant dans le voltmètre un tout petit transformateur dont le primaire est branché en dérivation sur les bornes de l'instrument et dont le secondaire est dérivé sur la bobine mobile, on arrive à rendre les indications tout à fait indépendantes de la fréquence. Il est nécessaire, pour obtenir ce résultat, que le primaire du petit transformateur ait une très grande résistance ohmique. Dans ces conditions, la tension dans le secondaire augmente alors un peu avec la fréquence ; cette action complémentaire compense le retard qui est la conséquence d'une augmentation de fréquence.

Les voltmètres destinés à fonctionner sur des circuits à haute tension sont branchés sur le secondaire d'un petit transformateur réducteur.

Les ampèremètres pour courants de haute ou de basse tension et pour toutes intensités sont toujours accompagnés d'un petit transformateur dont le primaire, branché en série sur les conducteurs de la canalisation, ne comporte qu'une seule spire. Le secondaire a toujours une très grande résistance ohmique.

Les instruments Caron ne sont pas influencés par les champs magnétiques extérieurs, ni par les effets d'hystérésis ; leurs indications sont indépendantes des variations de fréquence et de température. Ils n'ont pas été étudiés pour être utilisés sur les circuits à courant continu.

Instruments de divers constructeurs. — Indépendamment des instruments qui viennent d'être décrits, il convient de citer ceux qui étaient exposés par diverses maisons et qui ne diffèrent des types précédents que par des détails de construction.

Des voltmètres et des ampèremètres à bobine mobile, du genre Deprez-d'Arsonval, étaient exposés par MM. Crompton et Cie, de Londres ; Keyser-Schmidt, de Berlin ; la Norton Electrical Instrument C°, de Manchester (États-Unis) ; la Eldridge Manufacturing C°, de Springfield (États-Unis), etc.

## INSTRUMENTS A INDUCTION

**Ampèremètre et voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.** — Ces instruments, destinés spécialement à la mesure des courants alternatifs, sont basés sur le principe des réactions produites par un flux variable s'exerçant entre des pièces métalliques fixes et mobiles convenablement disposées.

En principe, l'axe A (*fig.* 110) qui porte l'aiguille indicatrice est muni d'un léger disque en aluminium ou en cuivre rouge, susceptible de tourner dans l'étroit entrefer d'un électro-aimant M excité par un courant alternatif. Des écrans T, T, de forme convenable et faisant corps avec l'électro-aimant M, entourent partiellement le disque A, de telle sorte que le flux traverse ce disque directement sur une des parties de sa surface et agit ailleurs sur les écrans. Le flux produit par l'électro-aimant M, traversant directement une portion du disque A, produit dans ce dernier des courants de Foucault. Les écrans T, T, également en cuivre, sont aussi le siège de courants d'induction de même sens que ceux développés dans le disque. Il en résulte un couple qui s'exerce, dans le sens de la flèche, entre le disque mobile et les écrans fixes.

A ce couple moteur, il suffit d'opposer un couple résistant opposé au premier et produit, par exemple, par la torsion d'un ressort pour pouvoir mesurer l'effort développé entre le disque mobile et les écrans et obtenir ainsi une mesure des courants excitant l'électro-aimant M. Le circuit magnétique de ce dernier est naturellement constitué par des feuilles de tôle isolées afin de ne donner lieu qu'à des pertes par hystérésis.

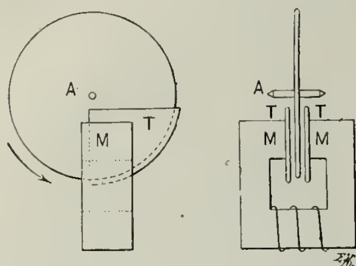



Fig. 110. — Principe des instruments à induction.

Les ampèremètres et les voltmètres à induction ne diffèrent entre eux que par la résistance donnée à la bobine de l'électro-aimant M.

Les bords du disque mobile sont placés entre les branches d'un aimant permanent afin de rendre ses mouvements apériodiques.

Les instruments à induction électro-magnétique présentent deux avantages importants au point de vue de la mesure des courants alternatifs :

1° *Les courants induits dans le disque mobile et dans les écrans ont la même forme ;* par suite, les indications données par ces instruments sont indépendantes de la forme des courbes de courant ;

2° *Les courants induits dans le disque mobile et dans les écrans sont toujours de même phase.* Il s'ensuit que les indications données sont indépendantes du coefficient de self-induction de la bobine de l'électro-aimant M et ne dépendent que de la valeur de la réactance de cette bobine. Dans ces conditions, les résistances non inductives que l'on est dans l'obligation d'employer pour constituer les bobines à fil fin des voltmètres peuvent être remplacées par des bobines inductives beaucoup moins coûteuses.

Les instruments à induction ne peuvent, toutefois, être utilisés que pour mesurer des courants de même fréquence que ceux qui ont servi à l'étalonnage.

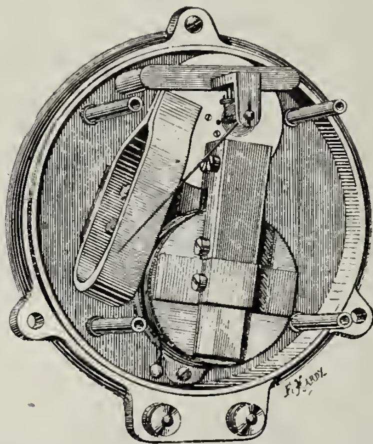


Fig. 111. — Vue intérieure d'un voltmètre à induction de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.




Fig. 112. — Voltmètre à induction de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Les figures 111 et 112 montrent respectivement l'aspect extérieur et l'intérieur du voltmètre à induction. Les écrans ne dépassent pas les pôles de l'électro-aimant M, comme on le voit en T sur la figure 110; afin d'éviter que le bord de droite des pôles de M n'agisse sur le disque mobile et ne contre-balance en partie l'effet exercé par le bord de gauche, les écrans sont retroussés et masquent les pôles de M sur la partie de droite.

Ces voltmètres se construisent pour différentes tensions jusqu'à 1 000 volts. Pour mesurer des tensions plus élevées, on utilise les mêmes instruments en y adjoignant un petit transformateur réducteur de tension (*fig.* 113). Dans ces conditions, le voltmètre n'est jamais relié directement avec le circuit à haute tension.

Lorsque les ampèremètres doivent être branchés sur des circuits à haute tension, on utilise, comme pour les voltmètres, un transformateur (*fig.* 113) dont l'enroulement à haute tension est très soigneusement isolé. L'ampèremètre est branché sur le circuit secondaire, comme le montre la figure 114.

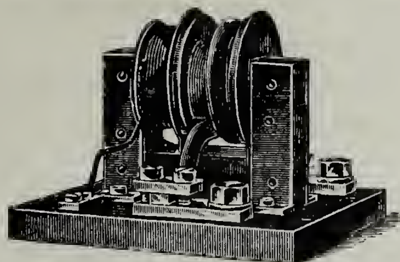


Fig. 113.
Transformateur réducteur de tension.

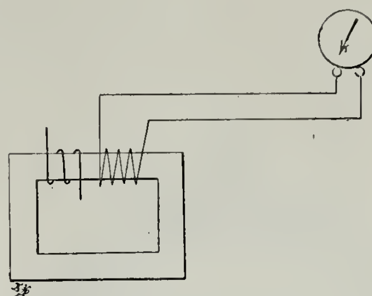


Fig. 114.
Montage d'un ampèremètre avec son transformateur.

Les ampèremètres utilisés sur des circuits à basse tension peuvent également être munis de transformateurs spéciaux lorsqu'on a à mesurer de grandes intensités. On n'a plus alors l'obligation de dévier les conducteurs de grande section pour les faire passer par le tableau de

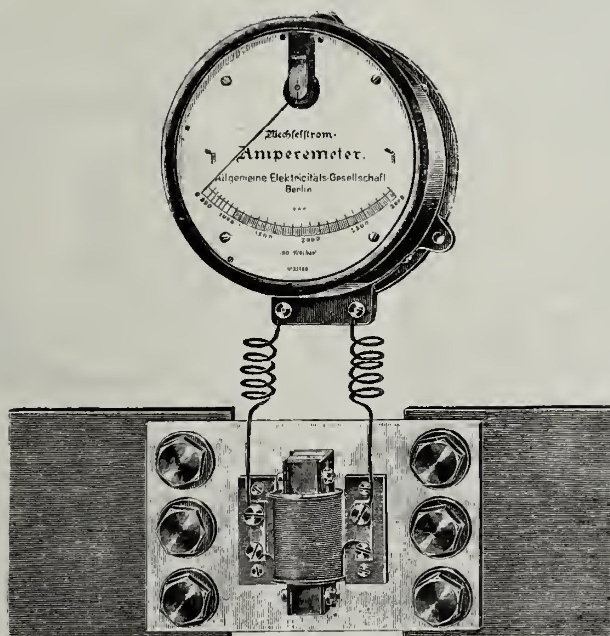



Fig. 115. — Ampèremètre à induction de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft avec son transformateur.

distribution. La figure 115 montre le dispositif de montage employé dans ce cas. Le transformateur de l'ampèremètre est directement intercalé sur les conducteurs principaux, et l'ampèremètre peut alors être placé à une certaine distance.

L'ampèremètre avec transformateur est également d'un emploi très commode, lorsqu'on veut utiliser le même instrument sur plusieurs circuits sans avoir à les ouvrir pour l'intercaler. On évite ainsi d'installer des commutateurs spéciaux et il suffit de placer un transformateur sur chaque circuit; l'unique ampèremètre se branche successivement sur les divers enroulements

secondaires des transformateurs, à l'aide d'un simple commutateur. La figure 116 montre ce dispositif pour deux circuits.

On obtient ainsi des mesures comparatives très exactes, résultat difficile à obtenir avec plusieurs instruments dont les indications sont rarement concordantes.

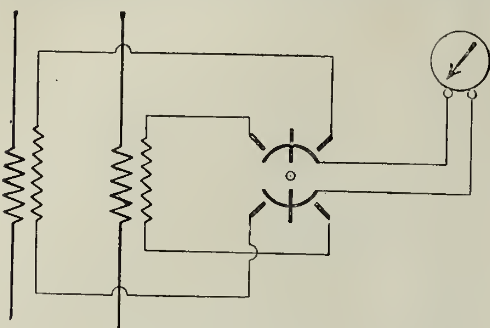


Fig. 116. — Montage d'un ampèremètre à induction desservant deux circuits.

Les instruments à induction ne sont naturellement utilisables que pour la mesure des courants alternatifs.

**Ampèremètre et voltmètre Ferraris.** — Ces instruments, construits et exposés par la Société Siemens et Halske, de Berlin, se composent, comme on le voit sur la figure 117, d'un léger tambour en aluminium *bb*, en forme de cloche, dont les bords pénètrent dans les entrefers de deux systèmes d'électro-aimants *ee*, *ff*. A l'intérieur de la cloche, on trouve un cylindre *c* en fer doux destiné à diminuer la réluctance des circuits magnétiques des électro-aimants.

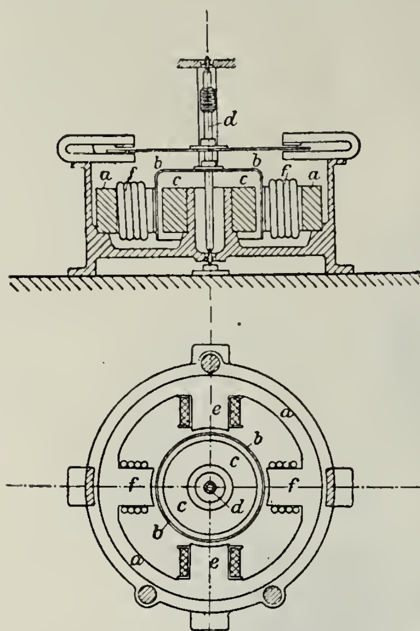



Fig. 117. — Détails de construction des ampèremètres et voltmètres Ferraris.

Les électros *f*, *f* sont recouverts d'un enroulement traversé par le courant à mesurer. Au contraire, les enroulements des noyaux *e*, *e* sont fermés sur eux-mêmes.

Il se produit, par suite, un champ tournant qui

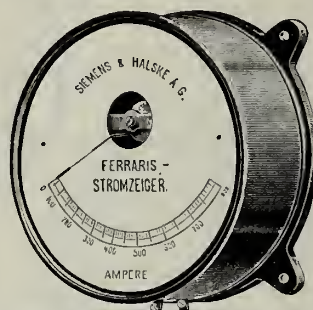



Fig. 118. — Ampèremètre Ferraris.

tend à entraîner la cloche en aluminium retenue par un ressort spiral formant le couple antagoniste.

La déviation est fonction de l'intensité ou de la tension du courant qui circule dans les bobines *f*, *f* et qui induit des courants de phases différentes dans les électros *e*, *e*.

L'apériodicité est obtenue par un frein électromagnétique constitué par un disque d'aluminium calé sur l'axe *d* et mobile entre les branches d'aimants permanents.

La figure 118 montre l'aspect extérieur des instruments Ferraris.

### INSTRUMENTS THERMIQUES

**Ampèremètres et voltmètres Hartmann et Braun.** — L'ampèremètre et le voltmètre thermiques construits par la maison Hartmann et Braun, de Francfort, comportent un fil en alliage de platine et d'argent de 0,6 mm de diamètre et d'une longueur de 16 cm, maintenu à ses deux extrémités par des attaches fixées sur une platine (*fig.* 119).

A ce fil est fixé, vers son milieu, un autre fil en laiton disposé normalement ; ce second fil, de 10 cm de longueur et de 0,5 mm de diamètre, a son extrémité libre fixée par une vis.

Du milieu du fil de laiton part un fil de cocon qui, tendu sur une petite poulie montée sur un axe mobile, est fixé, d'autre part, à un ressort-lame, grâce auquel tous les fils sont maintenus tendus.

Toutes les bornes de serrage sont isolées de la platine qui les supporte. Les deux bornes de serrage qui maintiennent les extrémités du fil de platine-argent sont reliées respectivement aux bornes d'entrée et de sortie du courant, de sorte que le courant à mesurer ne traverse uniquement que ce fil.

A la poulie mobile, dont les extrémités de l'axe, taillées en pointe, pivotent dans des trous garnis de rubis, est adaptée une aiguille indicatrice qui se déplace devant un cadran dont la graduation est tracée empiriquement.

Ce mécanisme fonctionne de la manière suivante : Lorsque le courant traverse l'instrument, le fil de platine-argent s'allonge et s'infléchit; par suite, la distance des points d'attache du fil de laiton diminue et ce dernier s'infléchit aussi, de sorte que le fil de cocon allant du milieu du fil de laiton à la poulie est sollicité par le ressort-lame et s'enroule, imprimant ainsi à la poulie un mouvement de rotation. Ce mouvement de rotation permet de mesurer l'intensité ou la tension du courant passant dans l'instrument. Le dispositif qui vient d'être décrit amplifie considérablement les augmentations de longueur du fil de platine-argent.




Fig. 119. — Ampèremètre thermique Hartmann et Braun.

Pour rendre les indications de l'instrument indépendantes de l'influence de la température extérieure, la platine qui sert de support au fil dilatable est formée, entre les deux bornes d'attache, partie en laiton, partie en fer, en proportions convenables. Grâce à cette disposition, la platine a le même coefficient de dilatation que le fil. En outre, la masse de cette platine est réduite au minimum, afin que l'état d'équilibre thermique se produise rapidement.

L'une des bornes d'attache du fil dilatable est disposée de manière que l'on puisse la déplacer à l'aide d'une vis, afin de pouvoir, au besoin, ramener l'aiguille indicatrice au zéro de la graduation.

Pour obtenir une apériodicité aussi parfaite que possible, l'axe supportant l'aiguille est muni d'un léger disque en aluminium qui se meut entre les pôles d'un puissant aimant permanent.

La sensibilité de ces instruments est plus grande vers la fin de la graduation qu'au commencement, l'énergie dépensée dans le fil dilatable ($RI^2$) augmentant proportionnellement au carré de l'intensité.

Le fil de platine-argent est disposé horizontalement afin de lui communiquer, en tous ses points, la même température que celle qu'accuse la platine lui servant de support. Si le fil était disposé verticalement, on n'obtiendrait pas le même résultat, étant donné que l'instrument s'échauffe davantage à sa partie supérieure.

Dans les ampèremètres, le fil dilatable est monté en dérivation aux bornes d'un shunt traversé par le courant à mesurer. La perte de tension dans l'instrument varie de 0,2 à 0,3 volt.

Dans les voltmètres, le fil dilatable a une résistance de 14,5 ohms. L'intensité de courant nécessaire pour obtenir le fonctionnement de l'instrument est d'environ 0,21 ampère. Il en résulte que ce voltmètre peut être utilisé pour mesurer des différences de potentiel très faibles,

au-dessous de 3 volts. Lorsqu'un voltmètre doit donner la déviation maximum pour des différences de potentiel inférieures à 3 volts, on fait passer le courant à travers le fil de laiton, mis en communication avec l'une des bornes, et on relie les deux extrémités du fil platine-argent à l'autre borne ; la résistance se trouve ainsi réduite au quart. Pour des tensions supérieures à 3 volts, on ajoute des résistances en constantan qui sont montées en série avec le fil de platine-argent et que l'on dispose au fond du boîtier de l'instrument. Comme le fil de platine argent a un coefficient de température faible et la résistance en constantan un coefficient nul, que, par suite, le rapport entre les deux est grand, la résistance totale du voltmètre et aussi ses indications sont indépendantes de la température extérieure.

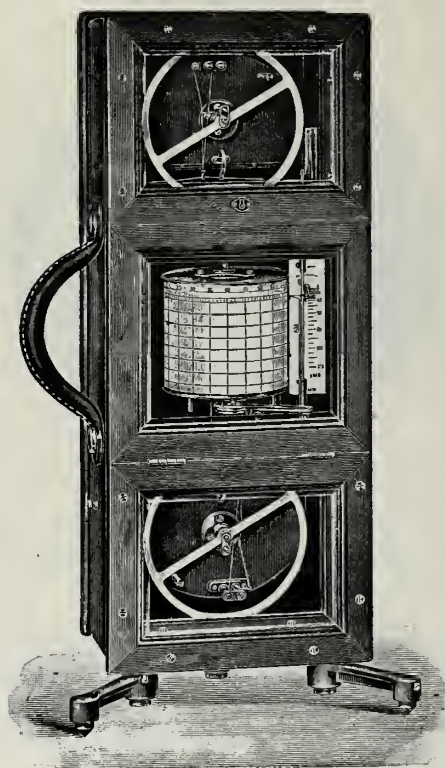


Fig. 120. — Ampèremètre thermique enregistreur Hartmann et Braun.

MM. Hartmann et Braun avaient également exposé un ampèremètre thermique enregistreur (*fig.* 120), qui comporte un fil dilatable traversé par une partie du courant à mesurer. Un second fil, identique au premier, mais qui n'est pas traversé par le courant, subit les effets des variations de température de l'atmosphère ambiante et en compense les effets.

La dilatation du fil thermique est amplifiée par un dispositif spécial qui fait tourner, dans le même sens, deux poulies légères et de grand diamètre, visibles, sur la figure 120, en haut et en bas de la boîte qui renferme l'instrument.

Un fil formant courroie est placé sur les deux poulies et porte, d'un côté, une plume, servant en même temps d'index mobile devant une échelle graduée et de plume inscrivante traçant sur le papier du tambour enregistreur la courbe des intensités en coordonnées rectangulaires.

Les oscillations sont amorties par l'emploi d'un frein électromagnétique, analogue à celui qui est employé dans les ampèremètres thermiques ordinaires des mêmes constructeurs.

Un mouvement d'horlogerie actionne le tambour enregistreur et un verrou permet de l'immobiliser et d'écarter en même temps la plume.

Cet instrument est facilement transportable et, dans la boîte vitrée qui sert à le renfermer, se rangent les trois pieds servant de support que l'on met en place lorsqu'on veut se servir de l'ampèremètre.

**Ampèremètre et voltmètre Chauvin et Arnoux.** — Les ampèremètres et voltmètres thermiques Chauvin et Arnoux (*fig.* 121) comportent les organes suivants :

1° Un fil dilatable en cuivre de 8 à 10 cm de longueur seulement;

2° Un dispositif amplificateur de la dilatation du fil ;

3° Un dispositif de compensation de la température extérieure.

Pour amplifier la dilatation du fil échauffé par le passage du courant, on a utilisé la propriété suivante des triangles :

Soit un triangle AFB (*fig.* 122) dont l'angle F est très sensiblement égal à $\pi$. On a, dans ces conditions :

$$f^2 = a^2 + b^2 - 2\,ab \cos F;$$

d'où, en différenciant, on obtient :

$$f df = ab \sin F \, d F,$$

c'est-à-dire :

$$\frac{dF}{df} = \frac{f}{ab \sin F},$$

relation qui montre que la variation dF de l'angle F pour un allongement d$f$ du côté $f$ est maximum, en faisant F très voisin de 180° et $b$ le plus petit possible.

On pourrait aussi faire l'angle F très voisin de zéro.

En réalité, le côté $b$ est constitué par le rayon d'un petit cylindre sur lequel le fil dilatable est fixé par une de ses extrémités.

Avec ce dispositif, on a pu obtenir une déviation de 90° avec une consommation d'énergie de 0,35 watt seulement dans le fil dilatable, ce qui correspond, dans l'ampèremètre, à un courant

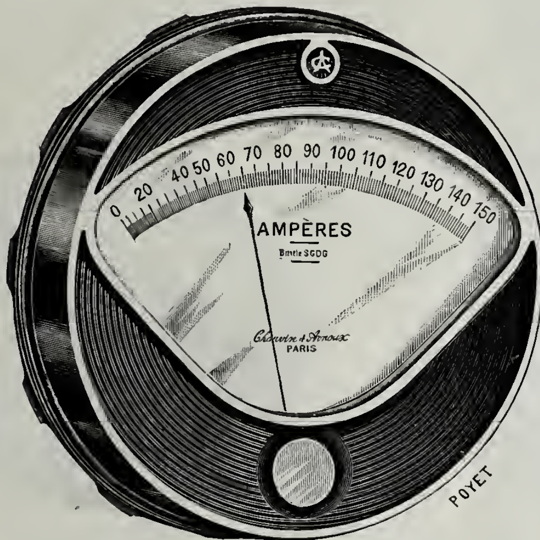



Fig. 121. — Ampèremètre thermique Chauvin et Arnoux.

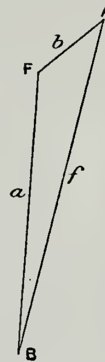



Fig. 122. — Principe des instruments thermiques Chauvin et Arnoux.

de 3,5 ampères sous 0,1 volt, alors que, dans les instruments similaires, il faut 0,4 volt pour obtenir la même sensibilité.

Le dispositif compensateur de la température ambiante consiste à fixer parallèlement au fil dilatable un faisceau de fils identiques et à tendre le tout à l'aide d'un fort ressort en acier. On obtient ainsi la fixité du zéro, l'action de la température agissant également et en même temps sur tous les fils.

Le fil dilatable $f$ s'attache, d'une part, à un axe dont le centre est en F et, d'autre part, à une pince B. La distance BF est invariable et le point B se déplace suivant l'allongement du fil. Le point B actionne l'aiguille indicatrice de l'instrument par l'intermédiaire d'un dispositif amplificateur mécanique. Les fils de compensation, de même métal que le fil dilatable, sont tendus parallèlement à ce dernier et viennent s'attacher à la même pince B.

Le voltmètre thermique ne diffère de l'ampèremètre qu'en ce que le fil dilatable qui, dans ce dernier, est dérivé aux bornes d'un shunt, se trouve, dans le voltmètre, monté en série avec une résistance non inductive de valeur appropriée.

Une vis spéciale permet de ramener l'aiguille indicatrice au zéro si, par suite d'accident, elle s'était déplacée.

**Voltmètres Richard.** — Les voltmètres thermiques exposés par M. J. Richard, de Paris, sont de deux types : à cadran et à enregistreur. Dans le but de supprimer les dispositifs amplificateurs de dilatation du fil, à cause de la délicatesse de ces organes, M. J. Richard emploie, comme fil dilatable un fil fin d'une certaine longueur.

Grâce à une série de cinq poulies de renvoi, cette longueur de fil peut se loger dans une boîte de 18 cm de diamètre extérieur.

Le fil traversé par le courant est d'un alliage spécial dont la résistivité est pratiquement constante, malgré les variations de température.

Il est monté dans le boîtier, comme le montre la figure 123, qui représente en plan et en coupe l'intérieur de l'instrument. Le fil est fixé, d'une part, en A, à un système compensateur B, qui a pour effet de rendre les indications de l'appareil indépendantes de la température ambiante.

Ce compensateur est constitué par un ensemble de deux métaux, dont les coefficients de dilatation sont très différents et qui ne sont autres que le zinc et l'acier-nickel connu sous le nom d'acier Guillaume.

Du point A, le fil passe successivement dans les gorges de petites poulies en ivoire $P_1$, $P_2$, $P_3$, $P_4$, $P_5$, montées sur pointes, et aboutit à l'extrémité du petit bras d'un levier C. Au grand bras de ce levier s'attache un autre fil, inactif, qui, après avoir fait un tour sur le tambour T, calé sur l'axe de l'aiguille E, vient se souder à l'extrémité D d'un ressort R destiné à maintenir l'ensemble dilatable constamment tendu.

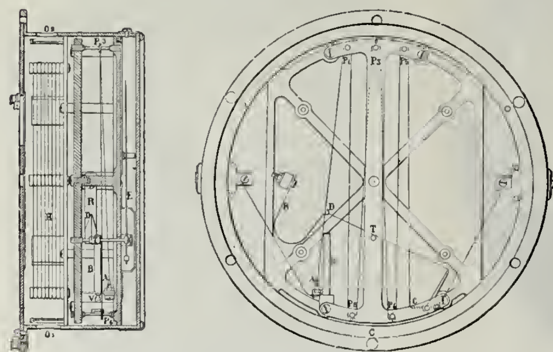


Fig. 123. — Détails de construction du voltmètre thermique Richard.

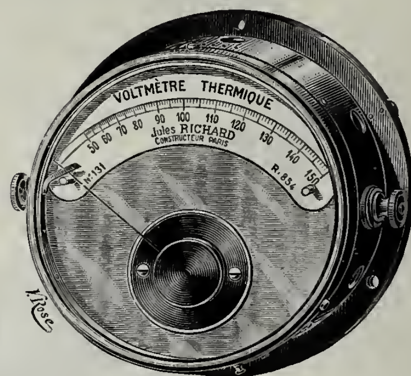



Fig. 124. — Voltmètre thermique Richard.

On amène l'aiguille au zéro de la graduation en agissant sur une vis V qui fait varier la position du compensateur B.

On accède à cette vis par une fenêtre pratiquée sur le pourtour du boîtier, cette fenêtre étant normalement fermée par une petite porte.

Le fil dilatable est monté en série avec un rhéostat H, établi avec un fil identique au fil dilatable. Ce rhéostat n'a pas de self-induction et sa résistance est réglée d'après la tension maximum que doit supporter le voltmètre.

L'ensemble du mécanisme est disposé sur un châssis métallique évidé sur lequel se place le boîtier en tôle oxydée.

Le rhéostat est placé dans ce boîtier muni de plusieurs ouvertures destinées à assurer un bon refroidissement.

Chaque ouverture est munie d'une chicane qui, sans gêner la circulation de l'air, empêche l'introduction de corps étrangers dans l'instrument. Ces voltmètres sont très sensibles et particulièrement apériodiques. Le zéro présente une grande stabilité et le fil dilatable peut être facilement remplacé en cas d'accident.

La figure 124 montre l'aspect d'ensemble des voltmètres thermiques à cadran. Les divers modèles ne diffèrent que par la graduation ; chaque modèle peut donner des indications dans les limites ci-après :

| | | |
|---|---|---|
| 20 à 60 volts. | 100 à 300 volts. | 300 à 1 000 volts. |
| 50 à 150 — | 200 à 600 — | 800 à 2 000 — |
| 80 à 250 — | 200 à 700 — | 1 000 à 3 000 — |

Le rhéostat est indépendant du boîtier à partir du modèle de 200 à 600 volts jusqu'à celui de 300 à 1 000 volts. Pour les voltmètres destinés à mesurer des tensions plus élevées, le rhéostat est remplacé par un petit transformateur réducteur de tension, ces derniers voltmètres étant exclusivement employés pour mesurer des tensions alternatives.

Dans le modèle enregistreur que représente la figure 125, l'aiguille est remplacée par un style d'aluminium terminé par une plume qui trace le diagramme sur un cylindre enregistreur à axe horizontal, faisant généralement un tour par 24 heures.

Les feuilles de ces enregistreurs donnent le volt par division pour le modèle de 60 à 150 volts. Dans le type de 120 à 300 volts, chaque division correspond à 2 volts et respectivement à 3 et 4 volts pour les types de 180 à 450 volts et de 240 à 600 volts.

Les dimensions d'encombrement du voltmètre thermique enregistreur sont : longueur 21 cm, hauteur 37 cm, profondeur 20 cm.

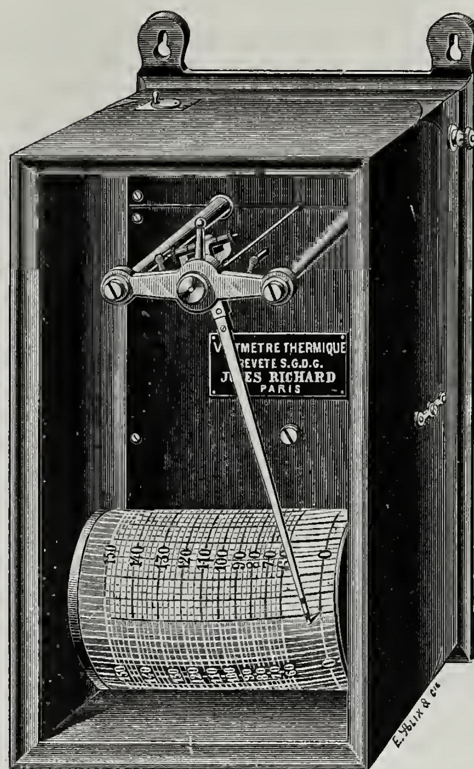



Fig. 125. — Voltmètre thermique enregistreur J. Richard.

**Ampèremètre et voltmètre Olivetti.** — Dans les ampèremètres thermiques, la dépense d'énergie est plus grande que dans les instruments du genre Deprez-d'Arsonval utilisés avec un shunt. C'est pour éviter cet inconvénient que M. Olivetti, d'Ivrea (Italie), a réalisé un nouveau modèle d'instrument thermique.

Le dispositif qu'il a employé est caractérisé par la diminution de la résistance du shunt et par le procédé d'amplification de la dilatation du fil traversé par le courant.

Dans l'ampèremètre, le fil thermique a une longueur de 10 à 12 cm et son diamètre est de 0,4 mm ; il est constitué par un alliage formé de 2 parties d'argent et d'une partie de platine. Cet alliage a une résistance spécifique de 32 microhms : centimètre, un coefficient de température qui est seulement de 0,00026 et un coefficient de dilatation linéaire atteignant 0,00015 ; il a, de plus, la propriété d'être inoxydable et d'avoir un point de fusion excessivement élevé ; enfin, sa résistance à la rupture est très grande, puisqu'un fil de 0,3 mm de diamètre ne se rompt que sous un effort de traction de 35 kg par millimètre carré de section.

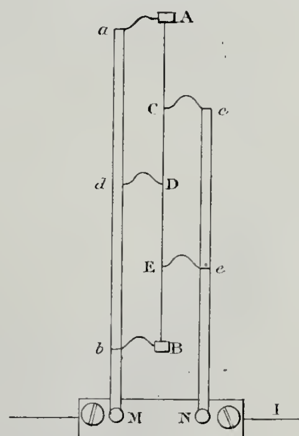



Fig. 126. — Ampèremètre thermique Olivetti.

La figure 126 montre schématiquement le moyen ingénieux employé par M. Olivetti pour réduire la consommation d'énergie dans le shunt de l'instrument. Le fil dilatable AB n'est pas simplement relié en dérivation, par ses extrémités A et B, aux bornes MN du shunt : la borne M est reliée par les trois points A, D et B avec le fil dilatable et la borne N, par les deux points C et E. Les connexions *b*B, *d*D, *a*A, E*e*, C*c* sont établies par des lames très souples en argent soudées sur le fil AB et sur les barres M*a* et N*c*, qui ont une résistance négligeable.

Si *u* est la chute de tension aux bornes du shunt MN, lorsque l'intensité du courant a une valeur I, si le fil AB, de résistance *r*, était branché entre MN, comme d'ordinaire, la consomma-

tion d'énergie électrique serait $\frac{u^2}{r}$. Avec le dispositif employé par M. Olivetti, la résistance réduite des quatre parties du fil n'a plus pour valeur que $\frac{r}{16}$ et la quantité d'énergie dépensée dans le fil devient $\frac{16u^2}{r}$. Il est donc possible de diminuer d'une manière très notable la valeur de $u$, c'est-à-dire la quantité d'énergie absorbée dans le shunt, tout en conservant à l'instrument la même sensibilité, autrement dit en dépensant dans le fil dilatable la même quantité de chaleur.

La résistance du shunt doit être pratiquement indépendante de sa température, afin que la chute de tension $u$ à ses bornes soit proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse. Il est donc nécessaire que ce shunt, comme le fil dilatable, soit fait avec un métal ayant un coefficient de température très faible.

Le dispositif employé par M. Olivetti pour amplifier la dilatation du fil thermique est le suivant (*fig.* 127) : le fil est attaché en P à une pince fixe et son extrémité opposée est soudée en F sur le levier OM tout près du point d'articulation O de ce levier.

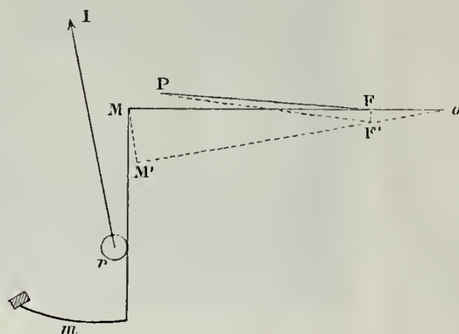



Fig. 127. — Dispositif amplificateur de l'ampèremètre thermique Olivetti.

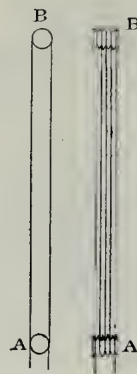



Fig. 128. — Fil thermique du voltmètre Olivetti.

Lorsque aucun courant ne traverse l'instrument, le levier et le fil thermique sont presque parallèles ; mais, si le fil PF, sous l'action du passage d'un courant, s'échauffe et s'allonge, le point M du levier OM vient en M′, et la longueur MM′ est beaucoup plus grande que l'allongement PF′-PF du fil thermique.

En M est fixée l'extrémité d'un cordonnet qui s'enroule dans la gorge d'une petite poulie $r$, calée sur l'axe de l'aiguille indicatrice I, tandis que l'extrémité opposée est attachée à un ressort $m$ qui maintient le système constamment tendu. Sur l'axe de l'aiguille indicatrice est également fixé un disque évidé en aluminium dont les bords pénètrent dans l'étroit entrefer d'un aimant ; on obtient ainsi un amortissement des oscillations qui assure l'apériodicité de l'instrument.

L'aiguille indicatrice de l'ampèremètre se déplace de 153 divisions sur le cadran pour un allongement du fil dilatable de 0,048 mm.

Le voltmètre thermique du même constructeur est représenté schématiquement sur la figure 128. Un fil de platine-argent de 0,03 mm de diamètre est enroulé plusieurs fois sur deux poulies de porcelaine munies de gorges.

Ces deux poulies sont distantes l'une de l'autre de 10 cm et, comme le fil dilatable fait environ 5 tours, sa longueur utile est de 1 mètre environ.

Chaque brin de fil se dilate, et l'allongement total est égal à la somme des allongements des 10 brins.

La poulie B est fixe, tandis que la poulie A actionne le petit bras d'un levier amplificateur qui commande l'aiguille indicatrice.

Suivant la tension que doit pouvoir mesurer le voltmètre, on monte en série avec le fil dilatable une résistance appropriée, non inductive et constituée avec un fil de même nature.

La disposition en brins parallèles du fil dilatable rend l'instrument très robuste et permet ainsi de suppléer à la faible résistance mécanique d'un fil qui n'a que 0,03 mm de diamètre.

### VOLTMÈTRES ÉLECTROSTATIQUES

**Voltmètre Carpentier.** — Cet instrument, basé sur le même principe que l'électromètre du même constructeur, comporte les mêmes organes, mais est disposé pour pouvoir être fixé sur les tableaux de distributions.

Ce voltmètre (*fig.* 129) ne diffère de l'électromètre que par la manière dont est obtenu le couple antagoniste, dû ici à l'action de la pesanteur sur une petite masse en aluminium fixée à l'armature mobile.

L'instrument est gradué empiriquement en volts et l'armature est munie d'une légère aiguille en paille vernie qui se déplace sur le cadran gradué.

L'ensemble du système d'armatures fixes et mobiles repose sur un chariot à glissière qui permet d'enlever le cadre mobile de sa position normale pour vérifier l'état des pivots qui lui servent de suspension.

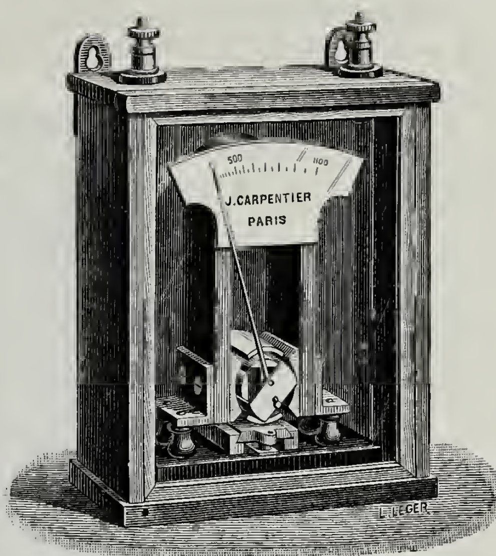


Fig. 129. — Voltmètre électrostatique Carpentier.

Ces voltmètres se construisent avec des graduations de 600 à 1 100 volts, de 700 à 1 500 volts, de 880 à 2 000 volts, de 1 000 à 2 500 volts et de 1 400 à 3 000 volts.

**Voltmètre Chauvin et Arnoux.** — Cet instrument (*fig.* 130) est basé sur le principe de l'électromètre à quadrants de lord Kelvin. Il comporte deux secteurs, l'un fixe et l'autre mobile, chargés à des potentiels différents et qui s'attirent mutuellement ; le secteur mobile porte une aiguille indicatrice qui se déplace sur un cadran gradué.

Afin d'obtenir des déviations proportionnelles aux tensions, on a donné une certaine courbure au secteur fixe.

Le secteur mobile se meut entre les branches d'un aimant puissant ; par suite, il est le siège de courants induits qui rendent ses mouvements apériodiques.

Afin de protéger l'instrument contre les décharges électrostatiques susceptibles de produire un court-circuit entraînant la destruction du voltmètre, une des bornes est reliée au secteur mobile par l'intermédiaire d'une résistance non inductive, très élevée, constituée par un simple trait de crayon tracé sur une plaque de verre dépoli.

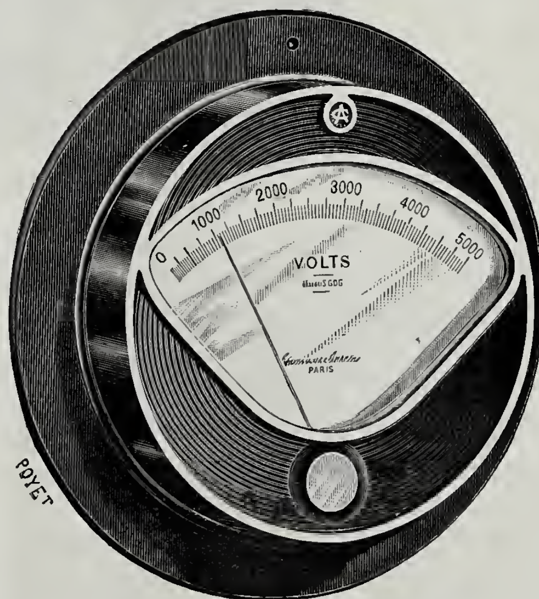


Fig. 130. — Voltmètre électrostatique Chauvin et Arnoux.

Les différents organes sont disposés sur un plateau d'ébonite qui assure une isolation par-

faite, afin d'éviter toute perte, si faible soit-elle, qui aurait pour résultat de fausser les indications; ils sont, en outre, recouverts d'une boîte métallique isolée, les préservant des influences électriques extérieures et qui peut, au besoin, être reliée à la terre.

Les prises de courant sont placées derrière le plateau isolant, hors de la portée de la main.

Des fils fusibles, placés à l'extérieur et faciles à remplacer, préservent les organes intérieurs en cas d'un court-circuit accidentel.

**Voltmètre lord Kelvin.** — Le voltmètre électrostatique de lord Kelvin (*fig.* 131) est constitué par un condensateur à air dont l'armature verticale en aluminium et en forme de 8 est

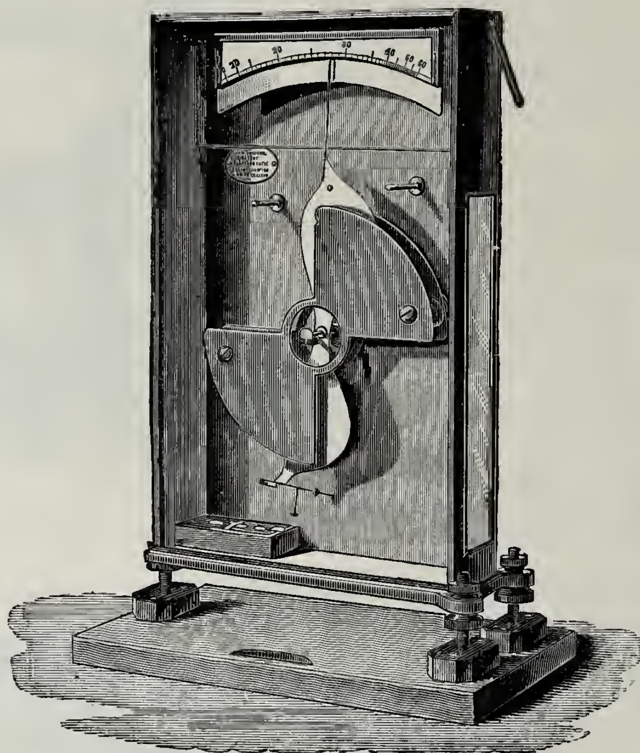


Fig. 131. — Voltmètre électrostatique lord Kelvin.

placée entre deux armatures fixes en laiton, ayant la forme de secteurs. Cet électromètre ne comportant qu'une paire de secteurs, la sensibilité de l'instrument est moitié moindre que celle des électromètres qui en comportent deux paires.

Les connexions entre les bornes de l'instrument et les armatures fixe et mobile du condensateur sont établies au moyen de tubes en U en verre, contenant un fil de coton humecté d'eau ; ce conducteur présente ainsi une grande résistance et on évite ainsi toute chance de détérioration de l'instrument, si un contact accidentel venait à se produire entre les armatures fixes et l'armature mobile ou la production d'un arc qui parfois aurait tendance à s'établir entre ces mêmes organes.

L'armature mobile est munie, à sa partie supérieure, d'une aiguille indicatrice qui se déplace devant un cadran gradué. Cette graduation comporte 60 divisions inégales, correspondant chacune à des différences de potentiel de valeur égale. A la partie inférieure de cette armature mobile, on peut accrocher différents poids servant à faire varier la sensibilité de l'instrument. Avec le poids le plus petit, chaque division du cadran correspond à 50 volts ; avec le poids moyen, à 100 volts, et, enfin, avec le gros poids, à 200 volts. Ces poids ont la forme d'un crochet,

ce qui permet de les suspendre au besoin les uns aux autres pour obtenir des sensibilités intermédiaires.

Le voltmètre électrostatique lord Kelvin n'est pas apériodique. On amortit les oscillations en manœuvrant avec précaution un frein que l'on actionne à l'aide d'une poignée disposée en dehors de la cage qui protège l'instrument. Ce frein est constitué par une petite tige horizontale en paille suspendue par deux fils de soie; à l'aide de la poignée, on approche ou on éloigne cette tige de l'armature mobile.

La cage de ce voltmètre est métallique et constitue ainsi un écran électrostatique.

Le voltmètre lord Kelvin est construit par M. James White, de Glasgow (Angleterre).

La Société Siemens et Halske, de Berlin, avait également exposé un type de voltmètre électrostatique du même modèle.

**Voltmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.** — Ce voltmètre électrostatique comporte une armature mobile dissymétrique, soumise à l'action de deux secteurs constituant l'armature fixe (*fig.* 132).

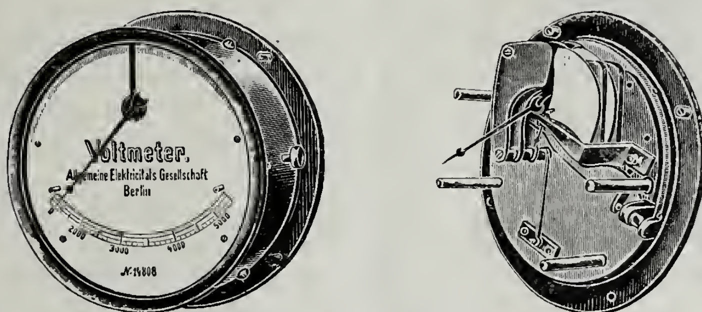



Fig. 132. —Voltmètre électrostatique de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le couple antagoniste est produit par un contrepoids.

Les oscillations de l'armature mobile sont amorties par un petit aimant.

Ces instruments présentent la particularité d'avoir des lames de micanite collées sur les faces internes des secteurs fixes, lames qui débordent largement afin d'éviter la destruction du voltmètre en diminuant les chances de production d'étincelles.

Ce dispositif empêche d'utiliser l'instrument pour la mesure des tensions continues, à cause de la polarisation du diélectrique.

**Voltmètre Hartmann et Braun.** — Ce modèle de voltmètre électrostatique (*fig.* 133) a été disposé spécialement pour les hautes tensions. Une armature fixe, presque verticale, agit sur une armature mobile suspendue, par sa partie supérieure, à un pivot qui lui permet de s'écarter légèrement de la verticale. La force antagoniste est l'action de la pesanteur.

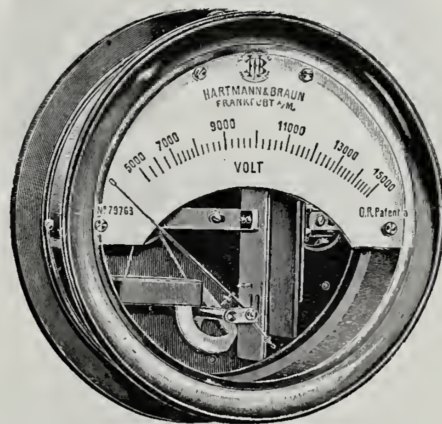



Fig. 133. — Voltmètre électrostatique Hartmann et Braun.

Comme le déplacement de l'armature mobile est très faible, on a amplifié ce mouvement en attachant à la partie inférieure de cette armature un fil qui s'enroule sur un petit treuil monté sur l'axe qui porte l'aiguille indicatrice.

Un disque métallique, tournant entre les pôles d'un aimant, constitue le système amortisseur de cet instrument.

**Voltmètre multicellulaire lord Kelvin.** — Cet instrument (*fig.* 134) a été spécialement établi pour être placé sur les tableaux de distribution. Il donne des indications pour des tensions comprises entre 40 et 120 volts.

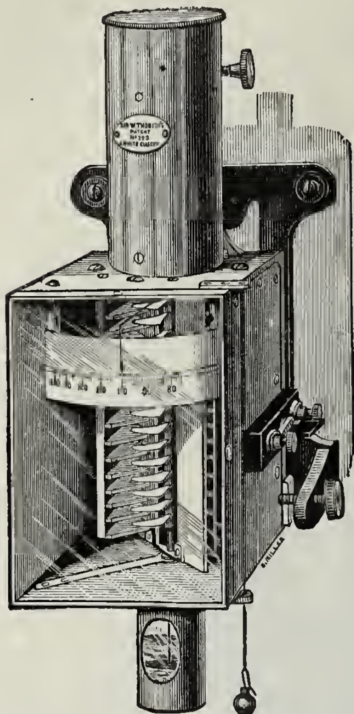


Fig. 134. — Voltmètre multicellulaire lord Kelvin.

Pour donner à l'instrument une sensibilité suffisante permettant de mesurer des tensions inférieures à 100 volts, on a multiplié le nombre de secteurs fixes et mobiles.

L'armature mobile est constituée par une tige suspendue munie de 12 à 15 secteurs; ces secteurs s'engagent entre les intervalles qui séparent un même nombre de secteurs fixes. L'instrument est gradué empiriquement en volts.

Un bouton, placé à la partie supérieure de droite de la cage qui protège l'instrument, sert à manœuvrer l'armature mobile pour l'immobiliser lorsqu'on ne se sert pas de l'instrument ou pour la mettre en liberté au moment d'effectuer une mesure. La tige mobile qui porte les secteurs se prolonge à sa partie inférieure et se termine par un disque amortisseur plongeant dans du pétrole.

Un fil à plomb sert à vérifier si l'instrument est bien placé dans une position verticale. Deux vis calantes, dont une est visible à droite sur la figure, permettent de rectifier la position.

Un interrupteur sert à supprimer la communication du voltmètre avec l'un des conducteurs.

La cage qui protège l'instrument est métallique et constitue un écran électrostatique.

Il se construit cinq modèles de ces voltmètres pour mesurer diverses tensions dans les limites suivantes :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| n° 1 | — de | 40 | à | 120 | volts, |
| n° 2 | — de | 60 | à | 240 | — |
| n° 3 | — de | 80 | à | 400 | — |
| n° 4 | — de | 200 | à | 800 | — |
| n° 5 | — de | 500 | à | 1 600 | — |

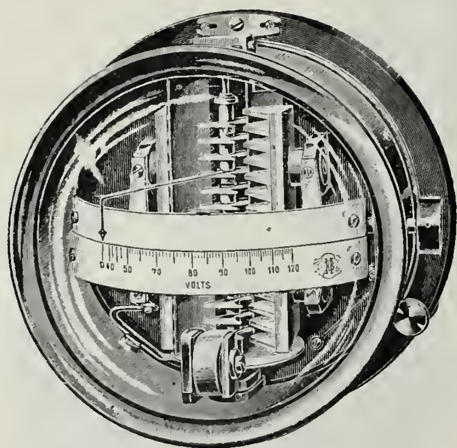



Fig. 135. — Voltmètre multicellulaire Hartmann et Braun.

**Voltmètre multicellulaire Hartmann et Braun.** — MM. Hartmann et Braun, de Francfort, ont construit un voltmètre électrostatique multicellulaire dans lequel la disposition des secteurs fixes et mobiles de celui de lord Kelvin a été conservée. Il en diffère par la suspension, dont le fil est logé à l'intérieur du petit tube qui porte les secteurs mobiles; dans ces conditions, on a pu supprimer le tube extérieur qui servait à protéger la suspension et l'instrument a pu être logé dans un boîtier circulaire de dimensions ordinaires.

En outre, l'amortisseur à liquide du voltmètre lord Kelvin est remplacé par un disque d'aluminium dont les bords passent entre les pôles de petits aimants.

**Voltmètre Riccardo Arno.** — Ce voltmètre électrostatique est basé sur le retard d'électrisation dû à la polarisation des diélectriques soumis à l'influence d'un champ électrique variable.

L'expérience fondamentale, réalisée en 1897, était la suivante : Sur un socle en ébonite

(*fig.* 136) sont fixés quatre segments *a*, *b*, *c*, *d* détachés d'un cylindre en métal et, au milieu de cet ensemble, est suspendu, par un fil de cocon O, un cylindre H en papier paraffiné.

Un alternateur M alimente le circuit primaire PQ d'une bobine de Ruhmkorff, dont on a calé le trembleur, ou d'un transformateur à très grand rapport de transformation. La tension est mesurée par un voltmètre V et l'intensité du courant, réglée par un rhéostat *r*, traverse un électrodynamomètre E.

Le secondaire de la bobine RS, où la tension atteint quelques milliers de volts, est fermé sur une résistance non inductive AB, montée en série avec un condensateur CD. On obtient ainsi entre les points A, B, C, D deux courants décalés d'un quart de période.

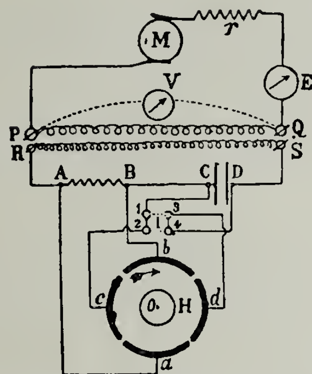



Fig. 136. — Principe du voltmètre Riccardo Arno.

Les segments *a*, *b*, *c*, *d* sont respectivement reliés aux points A, B, C, D.

A l'intérieur de ces quatre segments, il se développe un champ électrique tournant et le cylindre diélectrique H se met à tourner dans le sens de rotation du champ électrique.

Un inverseur 1, 2, 3, 4 permet de renverser la polarité des segments *c*, *d*, et l'on voit alors le cylindre H tourner en sens inverse, le sens de rotation du champ électrique se modifiant chaque fois qu'on agit sur l'inverseur.

A l'Exposition, M. Riccardo Arno a démontré cette propriété des diélectriques en faisant fonctionner un appareil à peu près semblable à celui qui vient d'être décrit.

Cet instrument, plus simple que le précédent, se compose d'un support en ébonite M (*fig.* 137), sur lequel sont collés trois secteurs en papier d'étain *a*, *b*, *c*. Ces secteurs ont un angle d'environ 120° et laissent entre eux trois bandes rayonnantes qui les isolent l'un de l'autre.

Au milieu du plateau d'ébonite est plantée une pointe qui sert de pivot à un disque de mica D, muni en son milieu d'une chape C identique à celle des aiguilles de boussole.

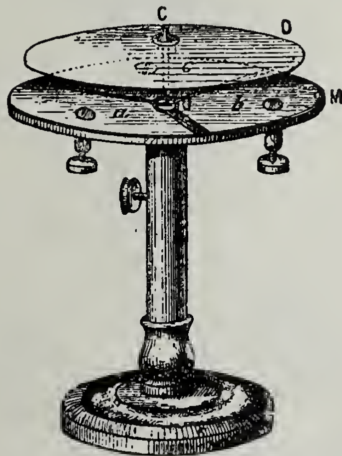



Fig. 137. — Appareil de démonstration du principe du voltmètre électrostatique Riccardo Arno.

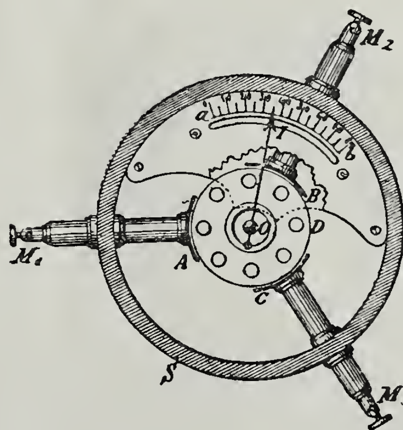



Fig. 138. — Voltmètre électrostatique Riccardo Arno.

Dès que les trois fils d'une distribution triphasée de haute tension étaient réunis aux trois bornes communiquant aux secteurs, le disque de mica, placé à quelques millimètres au-dessus, se mettait à tourner et prenait à peu près la vitesse du synchronisme, réalisant ainsi un véritable moteur asynchrone électrostatique.

En invertissant deux quelconques des fils, le champ tournait en sens inverse ; il en était de

même du disque de mica. Il suffit d'une tension de 1 000 volts pour assurer l'entraînement du disque.

Le professeur Riccardo Arno a construit plusieurs appareils de mesure, intéressants et fort simples, basés sur ce système, entre autres un voltmètre qui figurait à l'Exposition.

Dans cet instrument (*fig.* 138), on retrouve, comme dans l'appareil de démonstration, trois segments de cylindre métallique A, B et C, que l'on relie au circuit triphasé par l'intermédiaire des bornes $M_1$, $M_2$ et $M_3$.

Le cylindre D, en papier paraffiné, a sa partie supérieure percée de huit trous destinés à l'alléger. L'aiguille OI se déplace devant une graduation empirique *ab*.

Le champ tournant électrostatique exerce sur le cylindre D un couple proportionnel à la tension entre deux quelconques des bornes $M_1$, $M_2$, $M_3$, tandis que le couple résistant est produit par un petit ressort spiral de montre fixé au cylindre D et à l'axe de suspension.

Les divisions sont égales, ce qui ne se rencontre jamais dans les électromètres ordinaires. Celui-ci est certainement un des plus originaux.

---

V

# RÉSISTANCES ET INSTRUMENTS POUR LA MESURE DES RÉSISTANCES

## RÉSISTANCES

**Résistances étalons.** — M. J. Carpentier avait exposé une copie de l'étalon prototype de l'ohm constituée par un tube de verre horizontal, soigneusement calibré et terminé par des coupes élargies à chacune de ses extrémités ; ce tube est rempli de mercure pur. Pour établir la communication de l'étalon avec le circuit extérieur, on plonge dans les coupes des électrodes en cuivre amalgamé.

L'exposition de M. Carpentier comprenait également des étalons secondaires, à mercure, du modèle de M. R. Benoît (*fig.* 139). La colonne de mercure est renfermée dans un tube de verre plusieurs fois recourbé, de 1 mm² de section environ et de longueur réglée par tâtonnement pour amener la valeur de la résistance aussi près que possible de l'unité. Les extrémités de ces tubes pénètrent dans des flacons destinés à établir la communication électrique et servant, par conséquent, de prises de courant ; ces flacons ont une section d'environ 500 à 600 fois celle du tube dont les extrémités pénètrent jusqu'au quart environ de leur partie la plus large.

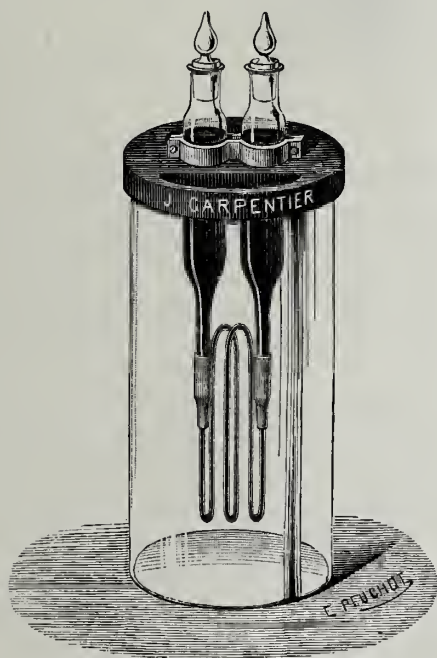



Fig. 139. — Étalon secondaire de l'ohm modèle R. Benoît.

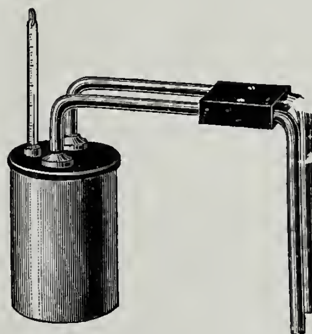


Fig. 140. — Étalon de l'ohm modèle Carpentier.

L'ohm étalon en fil métallique, exposé aussi par M. Carpentier, est en fil de maillechort ou de manganin roulé sur une bobine en bois paraffiné. La bobine terminée est recouverte d'une couche de paraffine destinée à empêcher l'humidité de produire des dérivations et placée ensuite dans une boîte cylindrique en laiton fermée par un couvercle en ébonite (*fig.* 140). Une ouverture pratiquée dans ce couvercle permet d'introduire un thermomètre à l'intérieur de la

boîte. Cet étalon est disposé pour pouvoir être plongé, si on le désire, dans un bain à température constante.

L'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg (Allemagne) exposait l'appareil servant à déterminer la valeur de l'ohm suivant la définition légale. Cet appareil comporte des tubes en verre remplis de mercure, disposés horizontalement, dont les extrémités pénètrent dans des boules en verre munies de fils de platine soudés servant à établir les connexions électriques. Cinq tubes semblables sont disposés dans une boîte en cuivre remplie de pétrole refroidi par de la glace fondante et, par conséquent, à la température de 0°. Les tubes sont préalablement soigneusement vérifiés au point de vue du calibre, de la longueur et de la section transversale. Ils sont, en outre, comparés soigneusement de temps en temps entre eux et avec les copies de l'ohm étalon, pour que l'Institut soit toujours en mesure d'effectuer les vérifications de résistances qu'on lui envoie.

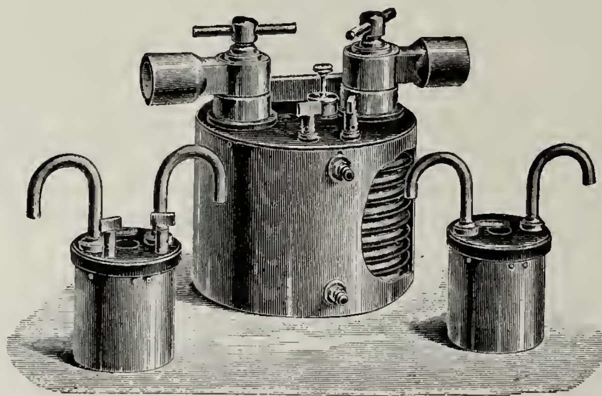


Fig. 141. — Résistances étalons, modèles Hartmann et Braun.

L'exposition de l'Institut physico-technique comprenait aussi des copies de l'ohm étalon établies avec des tubes de verre recourbés avec vases soudés aux extrémités. Ces appareils sont d'abord remplis de mercure pur; on y fait ensuite le vide et, enfin, on scelle les extrémités à la lampe d'émailleur. La valeur de l'ohm ayant été déterminée à la température de 0°, il est nécessaire, pour utiliser ces copies, de les plonger dans un bain de pétrole ayant cette température. Dans chaque vase extrême sont soudés trois fils de platine servant à établir les communications électriques.

L'appareil pour comparer les résistances étalons de valeurs approximativement égales, qui figurait également dans les vitrines de l'Institut, se compose de bains de pétrole de forme allongée, dont un peut être chauffé par la chaleur développée par le passage d'un courant dans une résistance. Pour la détermination du rapport de deux résistances, on se sert d'une boîte, reliée en dérivation, comportant deux résistances élevées, de 100 ohms par exemple; entre ces deux résistances s'en trouve une autre ayant pour valeur la millième partie de l'une d'elles, soit 0,1 ohm dans l'exemple actuel. La résistance du conducteur reliant les deux étalons à comparer est éliminée à l'aide d'une seconde boîte de résistances identique à la première. Grâce à ce dispositif, on peut atteindre facilement une précision de quelques millionièmes.

MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), exposaient des résistances étalons (*fig.* 141), établies d'après les types de l'Institut de Charlottenbourg. Ces résistances sont en manganin ou en constantan afin que leur coefficient de température soit négligeable. Les prises de courant de ces résistances sont nickelées pour pouvoir établir les connexions à l'aide de godets remplis de mercure. Ces résistances sont enfermées dans des boîtes de métal perforées, soigneusement nickelées pour pouvoir les plonger, sans qu'elles soient détériorées, dans des bains de pétrole lorsqu'on veut effectuer des mesures à température constante. Le modèle représenté sur la droite de la figure 141 se construit pour des résistances de 0,1 ; 1 ; 10 ; 100 ; 1 000 ; 10 000

et 100 000 ohms. Le modèle représenté sur la gauche de la même figure est celui des résistances de 0,01 ohm, pouvant être utilisées comme shunts d'ampèremètre; la résistance est constituée par une lame de manganin ou de constantan; ce modèle comporte, indépendamment des prises de courant, deux bornes d'attache spéciales. Enfin, le modèle représenté sur le milieu de la figure 141 est une résistance étalon de 0,001 ohm, pouvant également servir de shunt d'ampèremètre pour des courants dont l'intensité peut atteindre 500 et même 1 000 ampères, lorsqu'on utilise un dispositif permettant de refroidir convenablement cette résistance constituée par une lame de manganin à grande surface ; à cet effet, la résistance est placée dans un vase métallique que l'on remplit de pétrole et à l'intérieur duquel se trouve un serpentin parcouru par un courant d'eau froide; un agitateur mécanique permet d'uniformiser la température. Cette résistance étalon est munie, en outre, à la partie supérieure, d'une lame de cuivre servant à la mettre en court-circuit et de deux bornes destinées à recevoir les conducteurs du circuit dérivé et reliées directement aux extrémités de la résistance.

Les résistances étalons exposées par la Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), sont établies avec du fil de manganin dont le coefficient de température est inférieur à 0,00002 par degré centigrade. Ces étalons, exacts à 1/10 000 près de leur valeur, sont, sur demande, contrôlés et certifiés exacts par l'Institut de Charlottenbourg. Les petits modèles ont respectivement des résistances de 0,001 ; 0,01 ; 0,1 ; 1 ; 10 ; 100 ; 1 000 et 10 000 ohms. Les grands modèles, pour les très faibles résistances de 0,001 et de 0,0001 ohm, sont accompagnés d'un bain de pétrole avec agitateur mécanique et serpentin.

La Société Siemens et Halske avait également exposé un dispositif spécial pour la comparaison des résistances étalons. Ce dispositif comporte trois bains de pétrole séparés par des couches d'air; des godets à mercure servent à établir les communications et deux agitateurs, mis en mouvement par un petit moteur électrique, permettent d'uniformiser la température du bain. Cet appareil comporte, comme accessoires, deux boîtes de résistances contenant chacune deux bobines de 10 ohms, une résistance étalon de 0,01 ohm et deux résistances étalons de 10 ohms.

M. Otto Wolff, de Berlin (Allemagne), avait exposé dans les vitrines de l'Institut de Charlottenbourg des résistances étalons d'un nouveau modèle. Ces étalons, constitués par des lames de manganin, diffèrent des anciens modèles par la disposition donnée aux prises de courant qui sont établies à l'aide d'une pièce de cuivre massive dans laquelle sont soudées les extrémités des lames constituant la résistance. Les petits modèles, utilisés comme étalons et aussi pour les mesures d'intensité de courant par la méthode indirecte, ne peuvent absorber au maximum que 100 watts, même lorsqu'ils sont placés dans un bain de pétrole approprié; les grands modèles peuvent absorber jusqu'à 1 000 watts. Pour étalonner ces résistances, on prend des lames de manganin ayant une résistance moindre que la valeur que l'on veut leur donner; on diminue ensuite leur section transversale en perçant des trous plus ou moins grands jusqu'à ce que l'on ait obtenu la valeur exacte. Par ce procédé, on arrive sans difficulté à obtenir une résistance de 0,0001 ohm, exacte à moins d'un dix-millième.

M. Otto Wolff exposait aussi des résistances étalons en fil de manganin pour des valeurs allant depuis 0,1 ohm jusqu'à 100 000 ohms. Le fil de manganin employé est vieilli artificiellement avant l'étalonnage définitif en chauffant les bobines terminées, pendant dix heures, dans une étuve portée à la température de 140°. Dans ces conditions, on obtient des résistances variant aussi peu que possible avec le temps.

MM. Keiser et Schmidt, de Berlin (Allemagne), avaient exposé des résistances étalons établies d'après les types de l'Institut de Charlottenbourg et étalonnées à la température de 20°. Ces étalons, en manganin, sont enfermés dans une boîte métallique perforée que l'on plonge dans un bain de pétrole pour pouvoir en déterminer exactement la température et aussi pour obtenir une déperdition plus rapide de la chaleur produite par le passage du courant.

M. James White, de Glasgow (Grande-Bretagne), construit des résistances étalons de diverses valeurs, depuis 0,01 ohm jusqu'à 10 000 ohms, contrôlées par le Board of Trade. Ces

résistances sont en manganin; celles de 0,01, 0,1 et 1 ohm ont un double enroulement, l'un en gros fil, l'autre en fil fin servant à déterminer l'étalonnage avec la plus grande précision.

**Résistances étalonnées.** — Pour effectuer des mesures d'intensité de courant par la méthode indirecte de la chute de tension produite aux bornes d'une résistance parcourue par le courant, il est nécessaire d'avoir à sa disposition des résistances étalonnées ou shunts.

Ces instruments sont constitués par des lames, des barres ou des grilles de maillechort ou d'un autre alliage, dont la résistivité varie peu avec la température. Le plus souvent, ces résistances sont suffisamment refroidies par l'air ambiant; dans certains cas, il est nécessaire de les refroidir artificiellement.

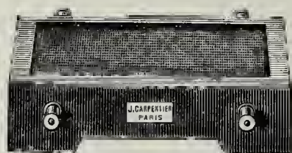



Fig. 142. — Shunt en fil de manganin.

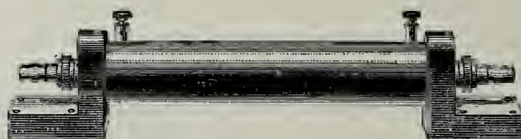


Fig. 143. Shunt de 0,0001 ohm à circulation d'eau.

M. J. Carpentier, de Paris, avait exposé plusieurs modèles de shunts. Celui que représente la figure 142 est en fil de manganin, ayant une résistance de 0,01 ohm et pouvant supporter un courant de 100 ampères. L'air ambiant suffit pour le refroidir convenablement. Les shunts à circulation d'eau (*fig.* 143 et 144) sont constitués par un tube de maillechort terminé à ses extrémités par des raccords permettant de les relier à une conduite d'eau, par l'intermédiaire de tubes de caoutchouc. Des prises de courant et des bornes sont soudées sur le tube, de façon



Fig. 144. — Shunt de 0,001 ohm à circulation d'eau.

que la résistance comprise entre ces dernières soit exactement de 0,0001 ohm (*fig.* 143) ou de 0,001 ohm (*fig.* 144). Le shunt de 0,001 ohm peut supporter un courant de 1 000 ampères et celui de 0,0001 ohm un courant de 2 000 ampères. Comme la différence de potentiel aux bornes de ces résistances ne dépasse pas 1 volt pour le courant le plus intense qu'ils ont à supporter, il n'y a pas à craindre de phénomènes d'électrolyse. L'étalonnage approximatif de la résistance, comprise entre les deux bornes, étant obtenu par excès, on le termine en frottant le tube avec du papier d'émeri très fin ou avec du rouge d'Angleterre.

MM. Chauvin et Arnoux, de Paris, ont exposé des shunts déjà décrits à propos de leurs ampèremètres. Ils sont formés de lames de maillechort superposées, entre lesquelles on a laissé un espace vide, égal à leur épaisseur, afin de faciliter le refroidissement. Ces lames sont soudées par leurs extrémités dans de fortes pièces de bronze qui se terminent par des mâchoires dans lesquelles on fixe les conducteurs. Ces shunts sont étalonnés en donnant de petits traits de scie dans les lames de maillechort.

Les résistances étalonnées exposées par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft, de Berlin (Allemagne), sont constituées par des barres de maillechort superposées, dont les extrémités sont prises dans deux blocs de cuivre munis de mâchoires pour fixer les conducteurs. Ces résistances se construisent en plusieurs dimensions et peuvent supporter des courants dont l'intensité peut atteindre 8 000 ampères pour le plus gros modèle.

La Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), construit des résistances étalonnées qui ont déjà été décrites avec le milliampèremètre et millivoltmètre exposé par cette Société.

MM. Crompton et Cie, de Londres (Grande-Bretagne), exposaient toute une série de résistances étalonnées en manganin sous forme de fils, de lames et de tubes avec refroidissement par l'air et par circulation d'eau.

MM. James White, de Glasgow (Angleterre), Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), et le Dr Horn (Allemagne) avaient également exposé des résistances étalonnées formées de lames de maillechort.

L'Institut de Charlottenbourg avait exposé un modèle des résistances très élevées de Kundt. Ces résistances présentent quelques particularités très intéressantes, surtout au point de vue de leur fabrication. Pour les obtenir, on prépare un mélange de chlorures d'or et de platine qu'on délaie dans de l'huile de camomille ; au moyen d'un pinceau imbibé de cette préparation et monté sur le chariot d'un tour, on trace une hélice sur un tube de porcelaine placé sur ce tour. Ce tube est ensuite porté à la température du rouge dans un four à moufle, les chlorures sont alors réduits à l'état métallique, laissant sur la porcelaine une hélice très adhérente et excessivement mince en or-platine. La résistance électrique de cette hélice est considérable ; ainsi, par exemple, sur un tube de 15 cm de longueur et de 4 cm de diamètre, on peut tracer une hélice de 1 mm de largeur dont le pas est de 0,5 mm ; sa résistance atteint plusieurs mégohms. Il est naturellement facile de tracer deux hélices voisines et réunies à une de leurs extrémités, de manière que cet enroulement ne présente pas de self-induction. L'étalonnage de ces résistances se fait très facilement en retouchant les spires à la meule d'émeri. Un dépôt galvanique, effectué aux extrémités libres des hélices, permet d'y souder des bornes de prise de courant. Les très grandes résistances étant d'un prix fort élevé, on a, par le procédé Kundt, un moyen économique de les obtenir.

La Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), exposait une résistance en graphite de 100 mégohms. Cette résistance, exempte d'induction et de capacité, se compose de cinq parties ayant de 10 à 50 mégohms ; elle est enroulée dans une rainure hélicoïdale pratiquée sur un cylindre d'ébonite protégé par une enveloppe en laiton. Le socle porte plusieurs bornes permettant de fractionner cette résistance.

## BOITES DE RÉSISTANCES ET PONTS

**Boîtes de résistances.** — Un grand nombre de boîtes de résistances, avec ou sans pont, figuraient à l'Exposition. Quoique les boîtes à chevilles soient toujours très employées, on tend aujourd'hui, surtout en Allemagne, à substituer aux chevilles des commutateurs à manette beaucoup plus commodes.

Dans les premiers modèles de boîtes à contacts glissants, le courant passait par l'axe des manettes et il en résultait des résistances de contact assez variables. On n'emploie plus maintenant ce dispositif et l'on utilise des commutateurs à balais, étudiés d'après les modèles bien connus de l'appareillage pour éclairage électrique et pour courants intenses. L'emploi de frotteurs à balais avec larges surfaces de contact donne toute satisfaction, le nettoyage des contacts se faisant automatiquement par suite du frottement produit par la manœuvre des manettes.



Fig. 145. — Boite de résistances à décades, modèle Carpentier.

Les boîtes de résistances à décades et à chevilles de M. J. Carpentier, avec ou sans pont

de Wheatstone, sont du modèle que représente la figure 145. Elles sont munies parfois de clés à ressort destinées à fermer les circuits de la pile et du galvanomètre.

Les boîtes à contacts glissants du même constructeur (*fig.* 146) comportent une série de plots disposés circulairement et sur lesquels viennent frotter des manettes. Chaque groupe de résistances (unités, dizaines, centaines, milliers) a une manette qui est reliée à celle du groupe suivant. Le courant, entrant par le plot zéro d'une série, traverse les bobines comprises entre ce plot et la manette, et, de là, va à la manette du groupe suivant. La manœuvre de ces boîtes est plus facile et plus rapide; mais elles sont moins précises que les précédentes à cause de la résistance variable des contacts qui, toutefois, est inférieure à 0,1 ohm pour tous les contacts de la boîte à quatre décades et à quatre manettes. Ces boîtes à contacts glissants se construisent aussi avec pont de Wheatstone permettant, par la manœuvre d'une manette supplémentaire, d'obtenir entre les bras de proportion les rapports 1/100, 1/10, 1, 10 et 100.

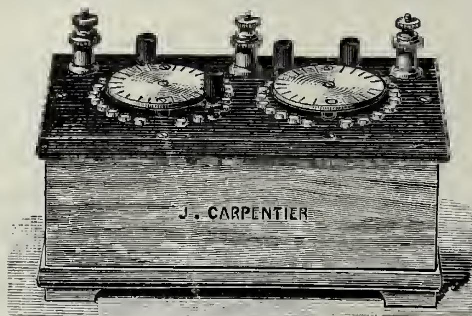



Fig. 146. — Boîte de résistances à contacts glissants, modèle Carpentier.

M. J. Carpentier exposait aussi une boîte de dix bobines de 100 000 ohms, donnant au total 1 mégohm.

La maison Breguet et M. Ducretet, de Paris, avaient également exposé des boîtes de résistances à chevilles du modèle bien connu.

L'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg (Allemagne) exposait plusieurs boîtes de résistances.

Une de ces boîtes, à chevilles, est du modèle Siemens et Halske avec bobines en fil de manganin et plots disposés pour recevoir, indépendamment des chevilles ordinaires, des chevilles spéciales munies d'une borne pour prise de courant. La série des résistances va de 0,1 à 50 000 ohms. Elle sort des ateliers de M. Otto Wolff, de Berlin.

Une autre boîte de résistances à contacts glissants comporte quatre décades, composées chacune de neuf bobines ayant une résistance de 0,1; 1; 10 et 100 ohms. Une seconde boîte du même modèle comporte également quatre décades de 1, 10, 100 et 1 000 ohms.

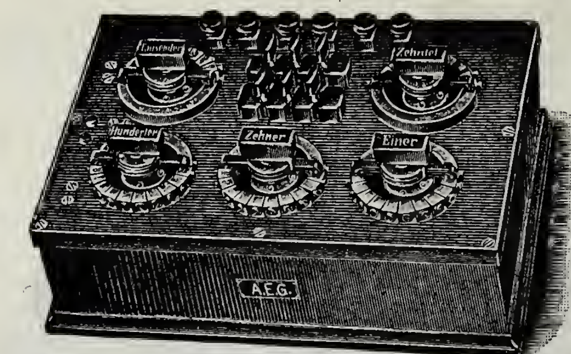



Fig. 147. — Boîte de résistances à décades et à manettes, modèle de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

L'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft, de Berlin, avait exposé plusieurs modèles de boîtes de résistances, parmi lesquelles nous citerons :

1° Une boîte de 10 000 ohms de résistance totale, à chevilles, graduée de 0,1 ohm à 5 000 ohms avec bras de proportion comportant chacun quatre bobines de 1, 10, 100 et 1 000 ohms;

2° Une boîte de résistances transportable avec pont et galvanoscope; la série des résistances va de 1 à 500 ohms;

3° Une boîte de résistances à contacts glissants avec cinq décades comprenant chacune neuf bobines ayant une résistance de 0,1; 1; 10; 100 et 1 000 ohms et bras de proportion à trois bobines de 1, 10 et 100 ohms (*fig.* 147).

Le D<sup>r</sup> Th. Edelmann, de Munich (Allemagne), construit des boîtes de résistances de précision avec bobines en fil de manganin qui, avant d'être étalonnées, sont soumises pendant un

certain temps à une température de 100°, afin de leur assurer une résistance constante. Toutes les bobines d'une valeur inférieure à 20 ohms ont un fil supplémentaire, relié en dérivation à l'enroulement principal, sur lequel on effectue les corrections, lors de l'étalonnage définitif. Le Dr Edelmann n'emploie pas, pour les boîtes de précision, les chevilles avec têtes en ébonite qui ne peuvent supporter l'effort nécessaire pour assurer un serrage suffisant entre les plots ; il utilise des fiches en laiton que l'on serre à l'aide d'une clé spéciale. De cette manière, toutes les irrégularités disparaissent et 30 chevilles de 7 mm de diamètre ne donnent pas une erreur supérieure à ± 0,0003 ohm. En outre, chaque boîte de résistances est munie d'un fil de manganin qui porte à une valeur simple la valeur des résistances de contact, soit 0,005 ohm, par exemple ; dans ces conditions, on peut effectuer immédiatement la correction.

Les boîtes de résistances à cheville exposées par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), ont leurs bobines à double enroulement établies avec des fils en alliage ayant un



Fig. 148. — Boîte à décades doubles et à manettes, modèle Hartmann et Braun.

coefficient de température pratiquement négligeable ; en outre, les bobines ne sont étalonnées qu'assez longtemps après leur fabrication. Le commencement et la fin de l'enroulement de deux bobines consécutives ne sont pas reliés à une tige commune, mais sont soudés à des tiges métalliques séparées et reliés à un même plot. Grâce à cette disposition, la somme des résistances, mesurées isolément, est égale à la résistance totale de la boîte. Chaque plot est fixé, à l'aide de rivets et de vis, sur la plaque d'ébonite servant de couvercle ; chacun d'eux porte, en outre, des ouvertures latérales destinées à recevoir des chevilles spéciales avec borne, permettant ainsi de prendre chaque résistance isolément, afin d'éviter toute cause d'erreur due aux résistances de contact des autres chevilles. Au lieu d'adopter, pour les séries de résistances d'une boîte, l'ordre habituel 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50, 100, etc., les résistances se succèdent dans l'ordre suivant : 1, 2, 3, 4, 10, 20, 30, 40, 100, etc.

Une boîte à décades doubles et à manettes (*fig.* 148) figurait également dans l'exposition de MM. Hartmann et Braun. Une seule manette suffit pour faire varier les résistances de chaque décade double ; dans ces conditions, quelle que soit la position des manettes, on a, entre deux bornes de l'instrument, une résistance de valeur constante, égale à la moitié de la somme des décades doubles, soit 10000 ohms, tandis qu'entre une de ces bornes et une troisième la valeur des résistances intercalées peut varier depuis 0 jusqu'à 10000 ohms.

Un autre modèle de boîtes de résistances à contacts glissants avec pont, également exposé par MM. Hartmann et Braun, comprend quatre décades de dix bobines ayant une résistance de 1, 10, 100 et 1 000 ohms, au total 11 110 ohms; les bras de proportion comportent chacun trois bobines : l'un avec des bobines de 1, 10 et 100 ohms; l'autre avec des bobines de 10, 100 et 1 000 ohms. Cette boîte est munie, en outre, d'une clé à double contact et permet de mesurer des résistances depuis 1 ohm jusqu'à 10 mégohms.

MM. Keiser et Schmidt, de Berlin (Allemagne), avaient exposé :

1° Une boîte de résistances de précision à chevilles, établie d'après les modèles de l'Institut de Charlottenbourg;

2° Une boîte de résistances à décades et à chevilles ;

3° Une boîte de résistances, formant pont de Wheatstone, avec bobines de 1, 10, 100 et 1 000 ohms dans chaque bras de proportion ;

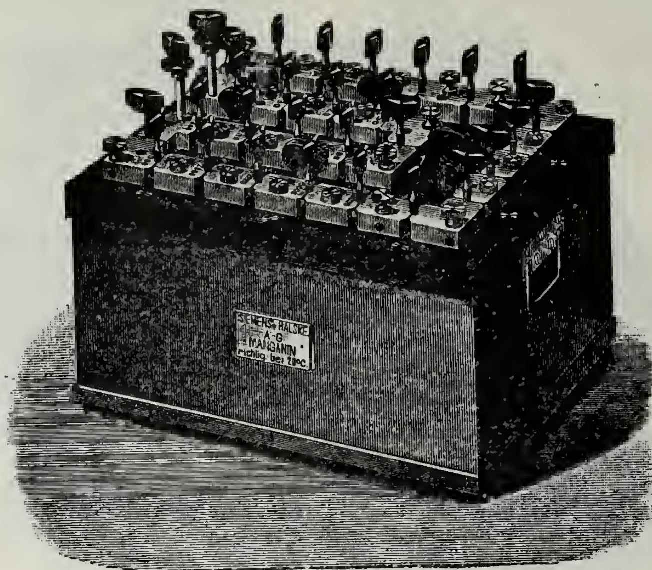



Fig. 149. — Boîte de résistances à décades, modèle Kohlrausch.

4° Une boîte de résistances à décades et à contacts glissants du modèle adopté par le service technique des télégraphes ;

5° Une boîte de résistances à chevilles depuis 0,1 ohm jusqu'à 1 000 ohms avec pont, ayant quatre résistances, de 1, 10, 100 et 1 000 ohms, dans chaque bras de proportion;

6° Une boîte de résistances à chevilles, par décades, ayant respectivement chacune dix bobines de 0,1 ; 1 ; 10 et 1 000 ohms avec pont de Wheatstone dont les bras comportent chacun quatre résistances de 1, 10, 100 et 1 000 ohms ;

7° Une boîte de résistances avec pont, du modèle du service technique des télégraphes; cette boîte avec contacts glissants comporte cinq décades circulaires et les bras de proportion du pont ont chacun trois bobines de 10, 100 et 1 000 ohms.

Parmi les nombreux instruments exposés par la Société Siemens et Halske, de Berlin (Allemagne), on peut citer les suivants :

1° Boîte de résistances de précision à chevilles, du modèle de Kohlrausch, ayant une résistance totale de 20 000 ohms; les bobines sont complètement exemptes d'induction et de capacité; elles sont enroulées d'après le système Chaperon avec fil unique, chaque couche ayant un sens d'enroulement inverse du précédent. Les résistances sont égales à la valeur inscrite à moins de 1/2000. La disposition donnée aux plots permet, à l'aide de chevilles, d'isoler certains groupes de résistances (*fig.* 149) ;

2° Boîte de résistances de précision à contacts glissants d'une résistance totale de 10 000 ohms. Chacune des cinq séries comprend neuf bobines ayant une résistance de 0,1; 1; 10; 100 et 1 000 ohms. Le courant est amené aux différentes manettes par des ressorts en cuivre en spirale, afin d'éviter les résistances de contacts de l'axe ;

3° Boîte de résistances à contacts glissants, d'une résistance totale de 100 000 ohms avec quatre séries de neuf bobines ayant des résistances de 10, 100, 1 000 et 10 000 ohms. Une cinquième manette permet de mettre en circuit un fil de compensation de 10 ohms de résistance, lorsqu'on veut mesurer des résistances inférieures à 10 ohms (*fig.* 150) ;

4° Boîte de résistances à chevilles avec pont, d'une résistance totale de 10 000 ohms, avec bobines de 1, 10, 100 et 1 000 ohms dans chaque bras de proportion du pont.

Les instruments exposés par M. Otto Wolff, de Berlin (Allemagne), étaient, d'abord, une boîte de résistances à chevilles avec pont, comportant cinq bobines de 0,1 ; 1 ; 10 ; 100 et

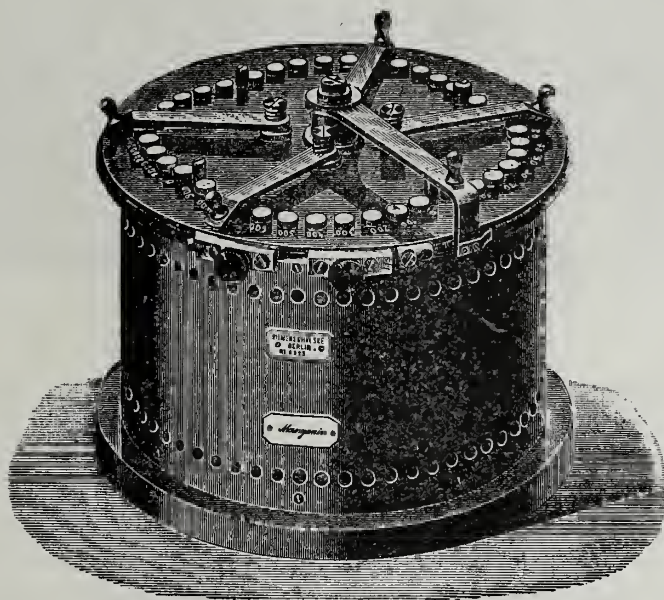



Fig. 150. — Boîte de résistances à contacts glissants, modèle Siemens et Halske.

1 000 ohms dans chaque bras et une série de bobines depuis 0,1 jusqu'à 50 000 ohms, formant ensemble une résistance totale de 111 100 ohms; puis une boîte de résistances à contacts glissants avec pont comportant dans chaque bras des bobines de 10, 100, 1 000 et 10 000 ohms, plus trois résistances supplémentaires de 1 ; 0,1 et 0,01 ohm qui, à l'aide de chevilles, peuvent être reliées à l'un des deux bras du pont; la série des résistances de comparaison est disposée en six décades, dont les bobines ont respectivement 0,1 ; 1 ; 10 ; 100 ; 1 000 et 10 000 ohms.

M. Otto Wolff, de Berlin, exposait, en outre, dans les vitrines de l'Institut de Charlottenbourg, une boîte de résistances en fil de manganin recouvert, enroulé en une seule couche sur des feuilles de mica. Des contacts glissants permettent de faire varier les résistances mises en circuit ; les manettes sont munies de balais en lames minces d'argent qui glissent sur la tranche des feuilles de mica et établissent le contact avec les fils de l'enroulement dénudés en ce point ; la position des manettes sur les différentes résistances est indiquée par des chiffres qui se présentent dans de petites fenêtres ménagées à cet effet sur la partie biseautée antérieure de la boîte (*fig.* 151). Ce mode de construction des boîtes de résistances présente les avantages suivants :

1° Manœuvre rapide et facile ;

2° Résistances de contact excessivement faibles

3° Ventilation parfaite des résistances ;

4° Résistances sans induction ni capacité.

Le total des résistances de cette boîte atteint 100 000 ohms.

Dans la section anglaise, des boîtes de résistances avec et sans pont avaient été exposées par M. James White, de Glasgow; Crompton et Cie, de Londres, et la Cambridge Scientific Instrument Company, de Cambridge.

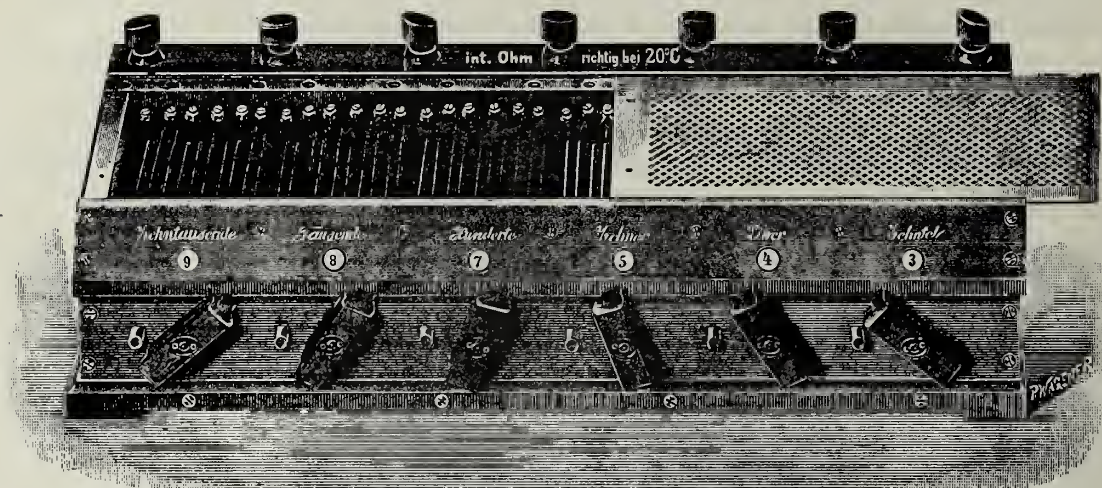



Fig. 151. — Boîte de résistances à manettes, modèle Otto Wolff.

**Pont de Wheatstone.** — Un pont grand modèle pour les mesures très précises de résistances, semblable à celui qui a servi à la comparaison des étalons de l'ohm légal établis par M. R. Benoît, était exposé par son constructeur, M. J. Carpentier.

**Ponts doubles lord Kelvin.** — Le pont pour la mesure de faibles résistances que représente la figure 152 a été réalisé par le même constructeur. Il est basé sur le principe du pont double de lord Kelvin et permet de mesurer des résistances comprises entre 1 microhm et 1 ohm.

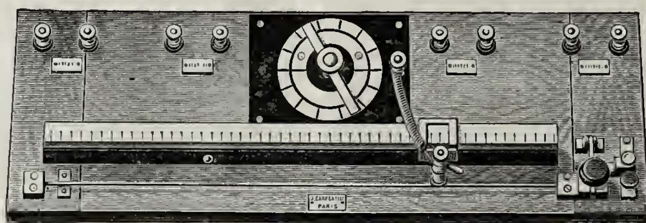


Fig. 152. — Pont Carpentier pour la mesure de faibles résistances.

Ce pont comporte deux couronnes de cuivre concentriques divisées en plusieurs secteurs ; la couronne extérieure a 14 secteurs, tandis que la couronne intérieure n'en a que 2. Un bras diamétral porte un frotteur à chacune de ses extrémités ; ce frotteur, constitué par un ressort lame, appuie sur les couronnes et les réunit métalliquement. Naturellement, les frotteurs sont isolés du bras qui sert à les manœuvrer. Chaque secteur de la couronne extérieure porte, gravé, un nombre ou une fraction ; ces secteurs sont reliés au point de jonction de deux séries de résistances constituant les bras de proportion du pont ; le simple déplacement du bras diamétral amène les conducteurs du galvanomètre aux deux points correspondants des deux séries de résistances et, par sa position, indique la valeur du rapport qui peut être 1/100, 1/10, 1, 10 et 100.

Une tige de maillechort bien calibrée et parfaitement étalonnée sert de résistance de comparaison ; un curseur, mobile sur cette tige, sert à faire varier la résistance intercalée et est muni d'une

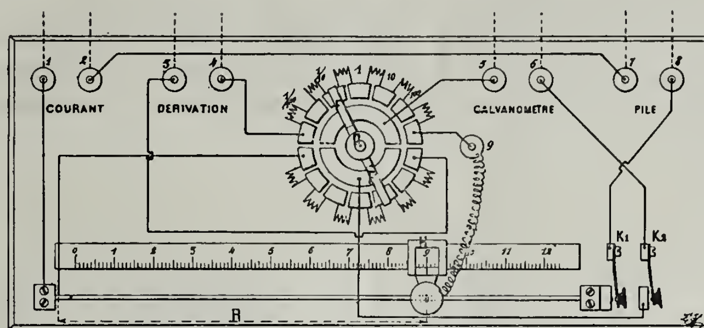



Fig. 153. — Schéma des connexions du pont Carpentier.

fenêtre avec repère qui se déplace au-dessus d'une règle divisée dont la graduation permet de déterminer la valeur de la résistance à mesurer. Les connexions à établir sont des plus simples.

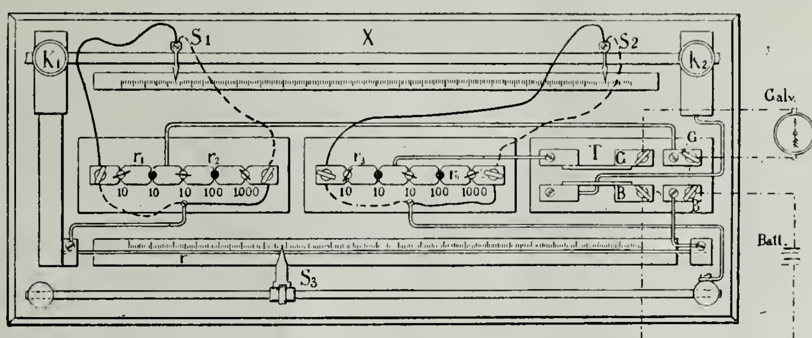



Fig. 154. — Pont double Hartmann et Braun.

On relie les bornes 1 et 2 (*fig.* 153), marquées « courant », à la résistance à mesurer, en dehors des points où la mesure doit être faite, ces derniers étant en communication avec les bornes 3

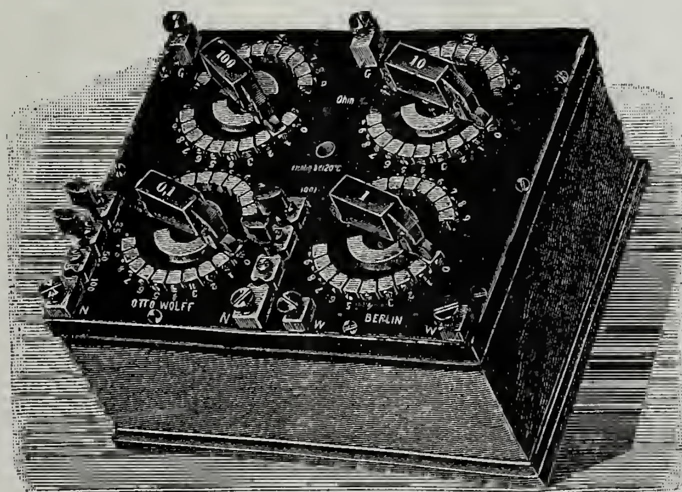



Fig. 155. — Pont double, modèle Otto Wolff.

et 4, marquées « dérivation ». Il n'y a plus alors qu'à amener les conducteurs du galvanomètre et ceux de la pile à leurs bornes respectives 5, 6, 7 et 8. L'équilibre s'obtient, une fois le rapport

convenable des bras de proportion trouvé, en déplaçant le curseur. La résistance mesurée est égale à la valeur de la résistance lue sur la règle en face du repère, valeur que l'on multiplie par le coefficient lu sur le bras diamétral.

Le pont double lord Kelvin, exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), est représenté schématiquement sur la figure 154. La résistance à mesurer se fixe entre les bornes $K_1$ et $K_2$ ; un galvanomètre très sensible et de faible résistance est relié aux bornes G, G,

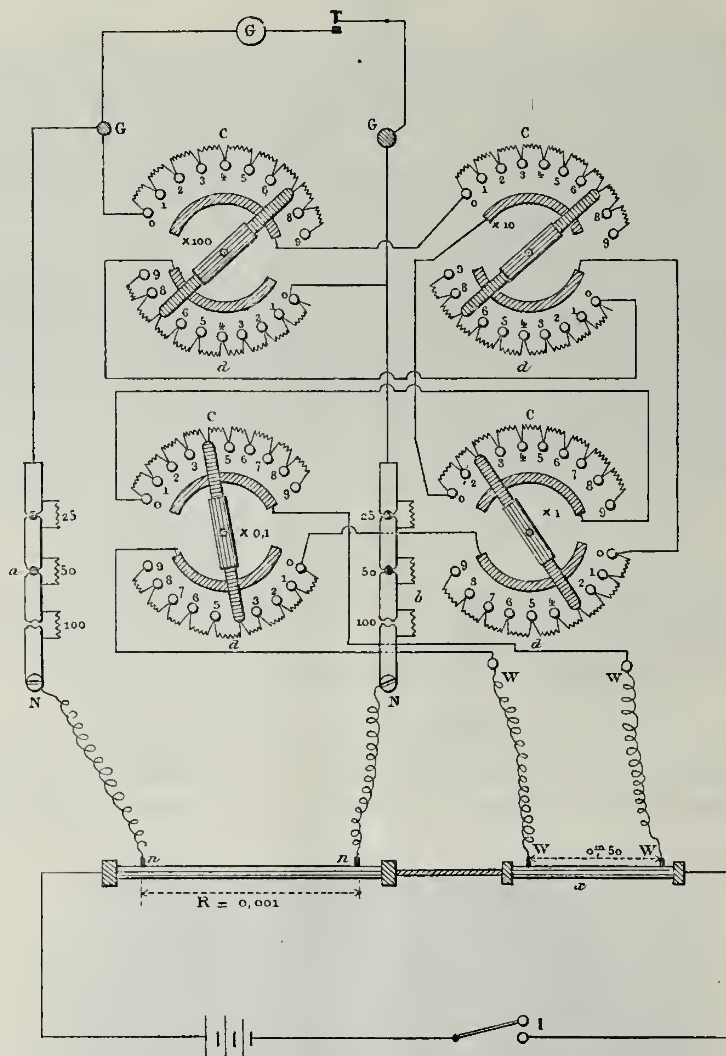



Fig. 156. — Schéma des connexions du pont double, modèle Otto Wolff.

et la source de courant aux bornes B, B. On retire les chevilles nécessaires dans les deux ponts de manière à obtenir une proportion convenable, proportion qui doit être la même dans les deux, et on déplace ensuite le curseur $S_3$ le long de la tige $r$, servant de résistance de comparaison et calibrée en millièmes d'ohm, jusqu'à ce que le galvanomètre reste à zéro. En désignant par $n$ la proportion des résistances du pont $\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$ et par $r$ la résistance lue sur la règle divisée en regard de l'index $S_3$, la valeur de la résistance mesurée, comprise entre les points $S_1$ et $S_2$, est donnée en multipliant $r$ par $n$. Lorsque la résistance à mesurer est supérieure à 0,1 ohm, on intervertit la position des conducteurs reliés aux deux extrémités de chaque pont, et la valeur lue sur la règle graduée doit alors être divisée par $n$.

Le pont double de lord Kelvin, du modèle employé par l'Institut de Charlottenbourg, est construit par M. Otto Wolff, de Berlin (*fig.* 155). On utilise comme résistance de comparaison un étalon R de 0,001 ohm, par exemple (*fig.* 156), placé à côté de la résistance à mesurer $x$, le tout étant immergé dans un bain de pétrole. Les deux résistances sont montées en série et parcourues par le même courant d'environ 2 ampères d'intensité par millimètre carré de section de l'échantillon à mesurer. Les bornes $n$, $n$ de la résistance étalon sont reliées aux bornes N, N du pont; les points W, W, limitant la résistance $x$ à mesurer et distants de 50 cm l'un de l'autre, sont reliés aux bornes W, W du pont.

Lorsque le galvanomètre reste au zéro, on a $x = \frac{c}{d}$, à la condition, toutefois, que, d'autre part, on ait $a = b$ et $c = d$.

Dans le pont que représente la figure 156, $a$ et $b$ sont des résistances ayant respectivement 100, 50 et 25 ohms; on choisit celle qui convient le mieux pour la mesure à effectuer, en ayant soin d'enlever la même cheville en $a$ et en $b$. On agit alors sur les manettes des quatre décades doubles (centaines, dizaines, unités et dixièmes), jusqu'à ce que l'on obtienne le zéro au galvanomètre. La valeur lue sur les secteurs du haut de chaque décade, par exemple 774,2 (*fig.* 156), permet de calculer la résistance mesurée par la relation :

$$x = 0{,}001 \cdot \frac{774{,}2}{100} = 0{,}007742,$$

dans laquelle 0,001 est la valeur de la résistance étalon et 100, celle de la résistance intercalée en $a$ et $b$. La valeur de $c$ est toujours égale à celle de $d$, puisque les manettes actionnent simultanément deux frotteurs reliant chacun une des séries de plots avec le secteur correspondant.

**Pont de Wheatstone-Kirchhoff.** — MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), exposaient un pont de Wheatstone-Kirchhoff (*fig.* 157), destiné surtout à mesurer la résistance des électrolytes. Il se compose d'un fil de 3 m de longueur servant de pont; la résistance de ce fil peut être décuplée à l'aide de deux résistances auxiliaires ayant chacune 4 1/2 fois la valeur de celle du fil et que l'on peut relier ensemble à l'une ou à l'autre extrémité du fil ou bien séparément de chaque côté. Le fil est disposé sur un cylindre en marbre blanc et fait 10 tours; la circonférence de ce cylindre est divisée en 100 parties. Une petite roue de contact, montée sur un axe, sert en même temps à faire connaître le nombre de tours du fil mis en circuit. Cinq bobines de résistance, avec enroulement du système Chaperon, ayant respectivement 1, 10, 100, 1000 et 10000 ohms, servent à établir la proportion convenable d'après la valeur des résistances à mesurer. Le galvanomètre est remplacé par un téléphone qui reste silencieux lorsque l'équilibre est obtenu. Comme source de courant, on utilise les courants fournis par une bobine d'induction.

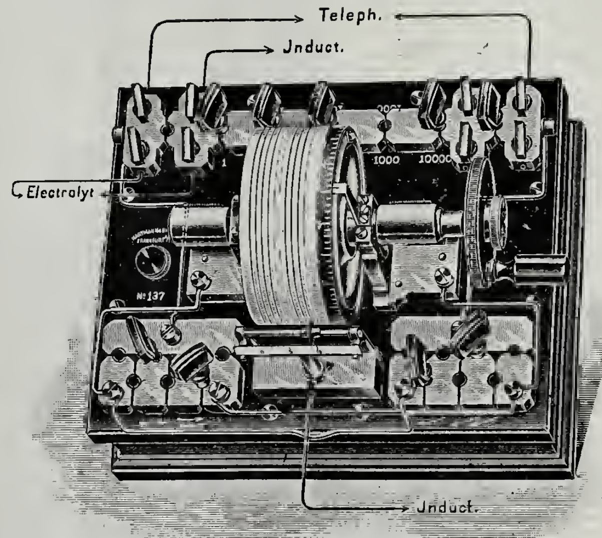


Fig. 157. — Pont de Wheatstone-Kirchhoff.

**Pont-téléphone de Nippoldt.** — Cet instrument (*fig.* 158), exposé par MM. Hartmann et Braun, est utilisé pour mesurer la résistance des conducteurs de paratonnerres. Il comporte un télé-

phone, forme montre, à l'intérieur de la boîte duquel est disposé un fil calibré, servant de pont et sur lequel glisse un contact muni d'un index se déplaçant sur un disque gradué. Une bobine de résistance de 1 ohm est reliée à une des extrémités du fil; une manette *i* permet d'y ajouter une bobine de 9 ohms. Une bobine d'induction, alimentée par une pile à liquide immobilisé, sert à actionner l'instrument; elle est reliée par un câble souple à deux conducteurs, d'une part à la manette servant à mettre les résistances et le fil calibré en circuit et, de l'autre, au contact mobile. Le téléphone est relié aux deux extrémités du pont par l'intermédiaire des bornes $g$ et $g_1$ ou $g_2$, mises en communication par une lame de cuivre. Un second câble permet de se relier à la terre pour fermer le circuit, si on désire employer la méthode de Wiechert. La résistance à mesurer est amenée aux bornes G et K, qui communiquent l'une à la manette du pont et l'autre à l'extrémité opposée du fil calibré.

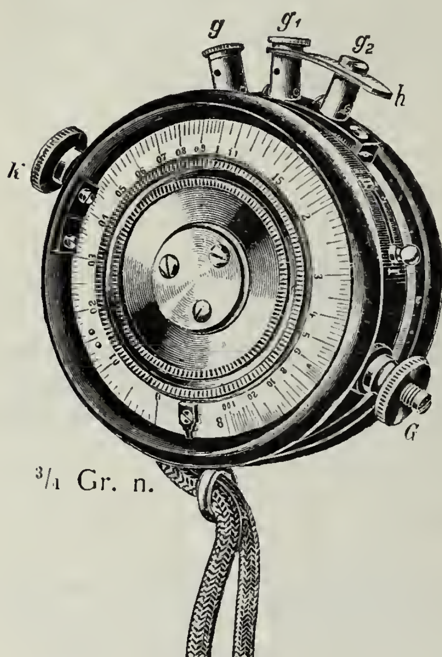


Fig. 158. — Pont-téléphone de Nippoldt.

Le pont-téléphone, la bobine d'induction, la pile, un galvanomètre et divers accessoires sont réunis dans une sacoche en cuir. Cet instrument permet de mesurer des résistances depuis 0,01 jusqu'à 100 ohms et de 0,1 à 1 000 ohms, lorsqu'on met en circuit la résistance de 9 ohms par la manœuvre de la manette; dans ce dernier cas, les lectures doivent être multipliées par 10. Pour remplacer le téléphone par un galvanomètre, il suffit d'enlever la lame de cuivre $h$ et de relier les conducteurs du galvanomètre aux bornes $g$ et $g_1$.

**Pont de Kohlrausch.** — Cet instrument (*fig.* 159), construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), se compose d'un fil calibré sur lequel glisse un curseur

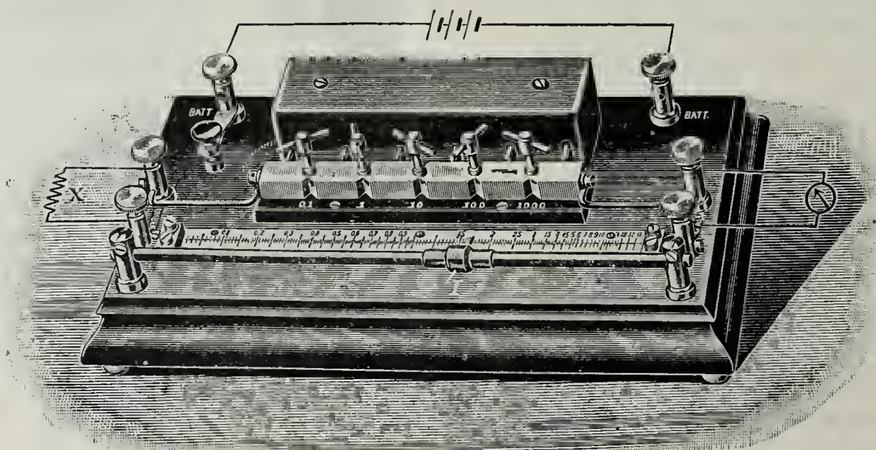


Fig. 159. — Pont de Kohlrausch.

muni d'un index I se déplaçant devant une règle graduée en ohms. Cinq bobines de résistance ayant respectivement 0,1; 1; 10; 100 et 1000 ohms permettent d'obtenir la proportion convenable pour la résistance à mesurer; on met en circuit celle de ces résistances qui laisse l'index I dans la partie médiane de la graduation. Cet instrument permet de mesurer des résis-

tances depuis 0,05 ohm jusqu'à 20000 ohms. La valeur de la résistance mesurée est donnée par le nombre lu sur la graduation que l'on multiplie par la valeur de la résistance de comparaison utilisée.

### OHMMÈTRES

**Ohmmètres Carpentier.** — M. Carpentier exposait deux types d'ohmmètres : l'un à circuits fixes, l'autre à circuits mobiles.

L'ohmmètre à circuits fixes présente l'aspect extérieur d'un voltmètre et fonctionne posé à plat.

Les circuits fixes comprennent deux bobines perpendiculaires au centre desquelles se trouve une armature de fer doux montée sur pivots.

Sous l'influence du champ résultant produit par les bobines traversées, l'une par le courant constant de comparaison, l'autre par le courant qui circule dans la résistance à mesurer, l'armature de fer prend une orientation définie par la position d'un index se déplaçant devant une graduation tracée expérimentalement.

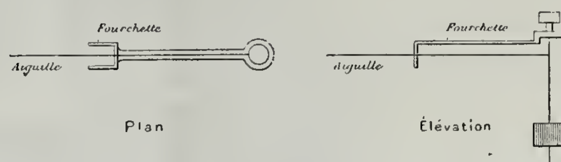


Fig. 160. — Fourchette de l'ohmmètre à circuits fixes, modèle Carpentier.

Pour que l'aiguille prenne de suite sa position d'équilibre, malgré le manque d'amortissement, une fourchette (*fig.* 160), mue par un bouton moletté, maintient l'index et ne lui permet

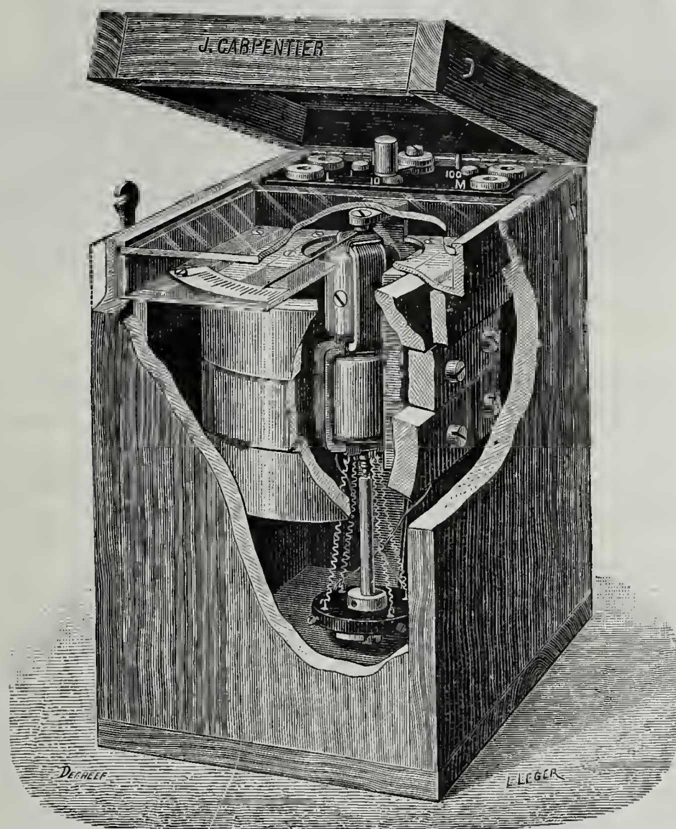


Fig. 161. — Ohmmètre à circuits mobiles, modèle Carpentier.

qu'un faible écart entre les dents de la fourchette. En tournant doucement le bouton moletté, l'aiguille, après avoir adhéré à la fourchette, finit par l'abandonner sans secousses et par prendre sans oscillations sa position d'équilibre.

L'ohmmètre à circuits mobiles (*fig.* 161) est constitué par deux cadres superposés, placés

à 90° l'un de l'autre et mobiles dans un champ magnétique très intense, créé par des aimants en U; des cylindres de fer doux, concentriques aux cadres mobiles, diminuent la réluctance magnétique.

Le courant est amené aux cadres par des boudins de fil d'argent très fins, que l'on choisit aussi souples que possible afin qu'ils ne fassent pas ressort.

L'un des cadres est relié avec la source de force électromotrice et l'autre est monté en série avec la résistance à mesurer. Dans ces conditions, les deux couples de sens inverse qui agissent sur les cadres sont tous deux proportionnels à la force électromotrice du générateur d'énergie électrique, et l'un d'eux est inversement proportionnel à la résistance à mesurer; l'équipage mobile prend alors la position pour laquelle ces couples sont égaux.

L'équipage mobile, constitué par les deux cadres et par l'aiguille indicatrice, est monté sur pointes et supporté par des chapes en agate.

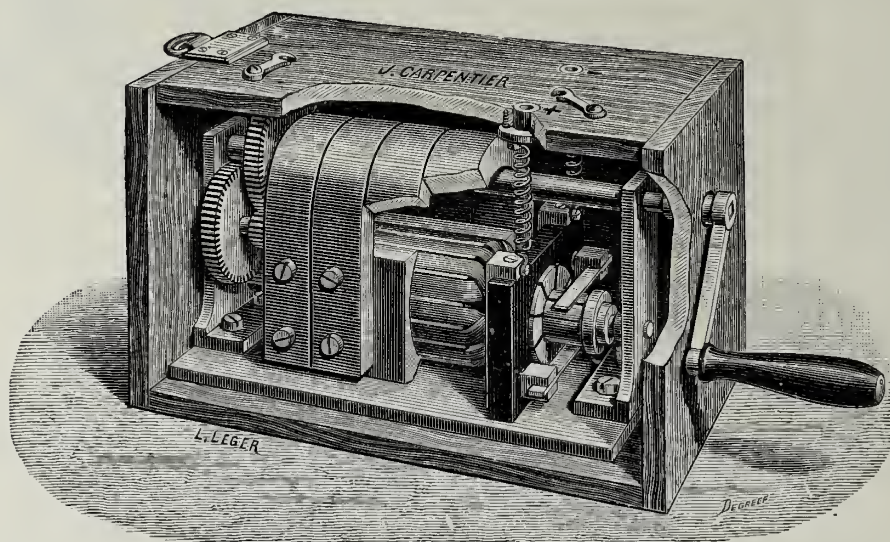



Fig. 162. — Magnéto pour ohmmètre Carpentier.

La graduation de l'instrument va de 100 à 50 000 ohms; mais, au moyen de deux shunts, on peut réduire de 10 ou de 100 fois l'action du cadre en dérivation, ce qui permet de mesurer jusqu'à 5 mégohms.

L'instrument est complété par une petite magnéto à main, pouvant donner un courant continu sous 120 volts à la vitesse angulaire de 100 tours par minute (*fig.* 162).

**Ohmmètre portatif Chauvin et Arnoux.** — L'ohmmètre portatif exposé par MM. Chauvin et Arnoux, de Paris (*fig.* 163), permet de mesurer rapidement et avec précision des résistances comprises entre 0,1 ohm et 20 mégohms. Il peut, par conséquent, être utilisé pour effectuer aussi bien des mesures de résistance ordinaire que des mesures de résistance d'isolement.

Basé sur le principe du pont de Wheatstone, ce qui rend ses indications indépendantes de la valeur absolue et des variations de la force électromotrice du courant employé, cet instrument comporte six bobines de résistance (*fig.* 164) servant de comparaison et ayant respectivement pour valeur 1, 10, 100, 1 000, 10 000 et 100 000 ohms. Ces bobines peuvent être substituées l'une à l'autre à l'aide d'un curseur C' que l'on amène à la main sur l'un des plots correspondant à ces diverses résistances. L'autre bras du pont est constitué par la résistance à mesurer que l'on relie aux bornes X, X'.

Les branches de proportion du pont sont formées par un conducteur très régulièrement roulé sur un cylindre en matière isolante, ce qui permet d'obtenir sur une faible longueur (40 cm) une résistance de plusieurs milliers d'ohms comparable, par conséquent, aux résistances

moyennes à mesurer. Sur ce cylindre-rhéostat et suivant une de ses génératrices, frotte un contact à ressort fixé sur un curseur C, muni d'un index se déplaçant le long d'une règle divisée ayant la même longueur que le cylindre-rhéostat.

Ce contact, en se déplaçant le long du fil du rhéostat, permet de faire varier de zéro à l'infini le rapport des deux résistances, dont la somme est constante et égale à celle du rhéostat entier. Les divisions de la règle portant le curseur sont telles qu'elles font connaître directement et sans calcul la valeur de ce rapport pour chaque position du curseur.

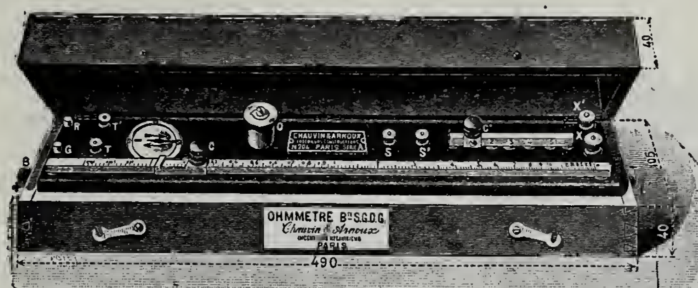



Fig. 163. — Ohmmètre portatif Chauvin et Arnoux.

Le galvanomètre G, employé comme instrument de réduction à zéro, est un galvanomètre apériodique très sensible, à cadre mobile dans un champ magnétique, ce qui dispense d'orienter l'instrument et permet de l'utiliser, même au voisinage des dynamos. Le cadre mobile est suspendu entre deux ressorts en boudin, ce qui donne une sensibilité bien plus grande qu'un montage sur pivots. En outre, le cadre mobile est serti entre deux bagues de cuivre pur qui

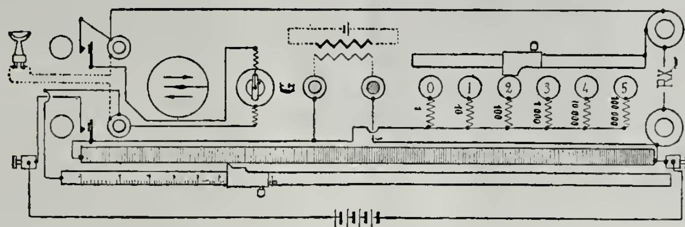



Fig. 164. — Schéma des connexions de l'ohmmètre Chauvin et Arnoux.

constituent un amortisseur électromagnétique puissant. L'équipage mobile est complété par une aiguille indicatrice en aluminium, dont l'extrémité se déplace dans le champ d'une forte loupe ; cette aiguille est pourvue d'une tête de torsion O, qui permet de la ramener facilement à zéro, en face d'un repère. A droite et à gauche de cette ligne de repère, deux flèches, orientées en sens inverse, indiquent dans quel sens il faut pousser les curseurs pour ramener l'aiguille à zéro, lorsqu'un courant traverse le pont.

La sensibilité du galvanomètre est telle qu'une force électromotrice de 15 à 20 volts est suffisante pour effectuer des mesures de résistance d'isolement allant jusqu'à 20 mégohms et de 1 volt, pour des résistances comprises entre 0,1 et 100 ohms.

Généralement, le courant est fourni par une batterie de 12 éléments de pile à liquide immobilisé que l'on peut loger dans une boîte ayant les mêmes dimensions en largeur et longueur que celles de l'instrument, mais de hauteur moitié moindre. Les conducteurs de la pile se relient respectivement aux bornes B, B′ placées en dehors de la boîte.

La valeur de la résistance mesurée est donnée par le nombre lu sur la règle divisée, lorsque l'équilibre est obtenu, en ayant soin de reculer la virgule de 0, 1, 2, 3, 4 ou 5 rangs vers la droite, en ajoutant de ce même côté autant de zéros que cela est nécessaire, suivant que l'on a employé l'une ou l'autre des résistances de comparaison qui portent les nos 0, 1, 2, 3, 4 et 5.

Cet ohmmètre peut être employé à la mesure des résistances avec un courant alternatif. Il suffit de substituer à la pile le secondaire d'une bobine d'induction et au galvanomètre un

téléphone ordinaire. Les extrémités du circuit secondaire de la bobine d'induction se fixent dans les bornes S, S′ et les fils du téléphone dans les bornes T et T′. Les lectures sur l'échelle divisée se font de la même manière que dans le cas du courant continu, le silence obtenu dans le téléphone correspondant à l'équilibre qui, dans l'autre cas, était indiqué par la position de l'aiguille du galvanomètre sur le zéro.

Naturellement, l'emploi des courants alternatifs et du téléphone ne permet d'effectuer des mesures exactes, correspondant au silence absolu dans le téléphone, qu'à la condition que la résistance à mesurer ne présente pas de capacité appréciable ou qu'une self-induction convenable compense exactement cette capacité.

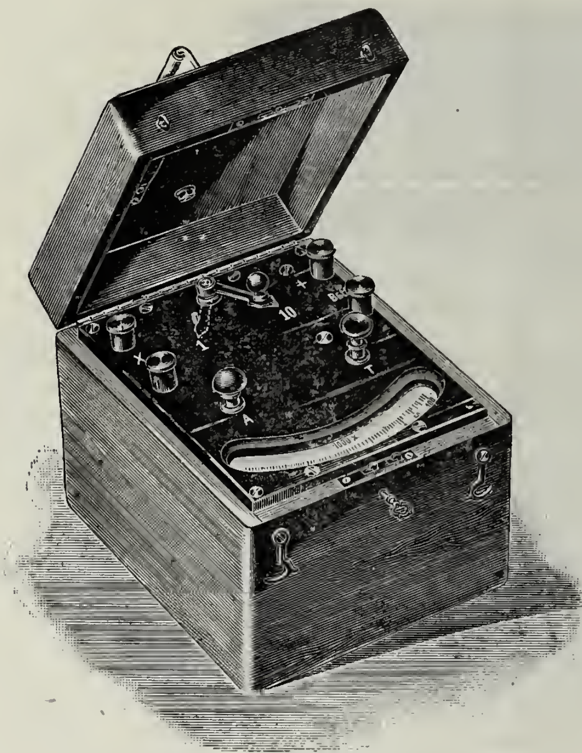


Fig. 165. — Ohmmètre Hartmann et Braun.

**Ohmmètre Hartmann et Braun.** — Cet ohmmètre à lecture directe (*fig.* 165) est constitué par un galvanomètre à deux cadres mobiles croisés, placés dans un champ magnétique homogène et permanent. La disposition adoptée est semblable à celle d'un galvanomètre différentiel, et les résistances sont déterminées par la mesure de la proportion $\frac{E}{I}$. L'instrument est gradué en ohms et muni d'un dispositif d'amortissement. Les mesures sont indépendantes de la tension du courant employé. Un shunt permet d'augmenter la limite des mesures. La résistance à mesurer est reliée aux bornes de gauche, marquées X, et la source de courant, qui doit avoir une tension de 100 volts environ, aux bornes de droite. Une clé et un mécanisme d'arrêt automatique pour l'équipage mobile du galvanomètre sont, ainsi que la manette du shunt, disposés sur la plaque d'ébonite servant de couvercle. L'instrument, destiné principalement au contrôle de l'isolement des canalisations, permet de mesurer des résistances d'isolement depuis 1 000 ohms jusqu'à 1 mégohm.

**Ohmmètre de l'American Electric Specialty Company.** — Cette compagnie, de New-York City, exposait un ohmmètre destiné à être mis entre les mains des personnes les moins familiarisées avec les mesures électriques. Cet instrument (*fig.* 166) se compose d'un pont de Wheatstone avec téléphone.

La boîte de l'instrument contient une pile de quelques éléments à liquide immobilisé et la résistance de comparaison qui est fixe et inaccessible.

On fait varier le rapport des bras de proportion du pont :

1° Par fractions importantes en déplaçant convenablement la cheville visible à droite sur la figure 166 ;

2° Par fractions aussi faibles que l'on veut, en promenant un style le long d'un fil métallique tendu entre deux échelles graduées.

Les conducteurs entre lesquels on veut mesurer la résistance d'isolement sont reliés aux bornes X, X, et la cheville est placée entre les plots extrêmes de droite. On fait glisser alors le style le long du fil jusqu'à ce que le téléphone reste silencieux. Si l'on ne peut obtenir ce résul-

tat, on recule la cheville d'un rang vers la gauche et on recommence l'opération. En continuant à déplacer la cheville et le style, on arrive à obtenir le silence dans le téléphone.

La valeur de la résistance d'isolement se lit directement sur l'une des échelles divisées au point qui se trouve en face du style, lorsque le silence du téléphone est obtenu. On lit la valeur de la résistance d'isolement sur l'une ou l'autre des échelles, suivant la position occupée par la cheville.

Pour éviter toute erreur, les plots entre lesquels se place la cheville ont une couleur différente, couleur qui est la même pour les échelles correspondantes.

Lors du transport de l'instrument, le téléphone K se place dans un compartiment ménagé sur la gauche de la boîte et fermé par une porte à coulisse.

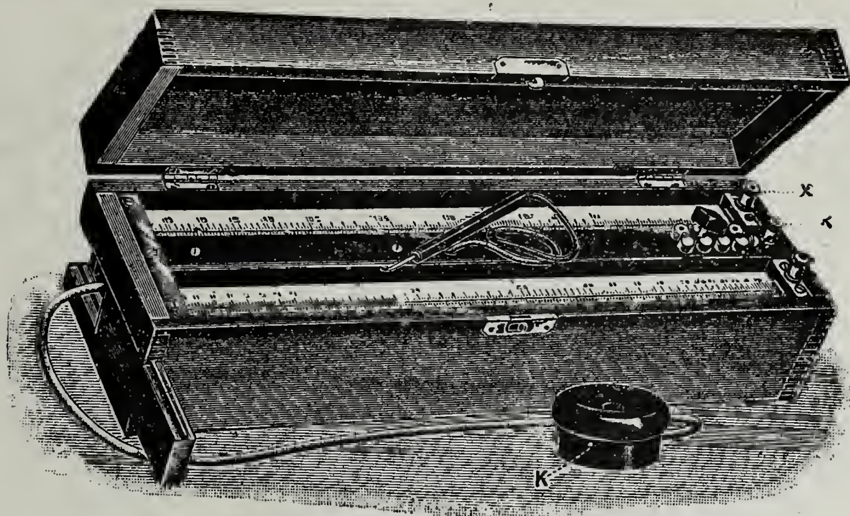



Fig. 166. — Ohmmètre de l'American Electric Specialty Company.

Il se construit quatre modèles d'ohmmètres de ce système :

1° Ohmmètre à quatre échelles de couleurs différentes, pour des mesures de résistances d'isolement jusqu'à 2 mégohms ;

2° Ohmmètre à quatre échelles pour mesurer jusqu'à 200 000 ohms ;

3° Ohmmètre à trois échelles pour mesurer jusqu'à 200 000 ohms ;

4° Ohmmètre à trois échelles pour mesurer jusqu'à 20 000 ohms.

D'autres modèles d'ohmmètres étaient également exposés, dans la section allemande, par la Société Siemens et Halske, par l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft et par M. Paul Meyer.

Parmi les constructeurs ayant exposé des instruments destinés à mesurer les résistances d'isolement des canalisations d'énergie électrique, nous citerons encore les suivants :

Le Dr P. Meyer, de Berlin, qui exposait un mégohmmètre portatif pour mesurer la résistance d'isolement d'une canalisation à deux conducteurs en charge parcourus par un courant continu de 550 volts.

MM. Hartmann et Braun, de Francfort, exposaient aussi plusieurs modèles d'installations transportables pour mesure de résistances d'isolement, comprenant : galvanomètre, shunt, lunette et échelle, batterie de piles à liquide immobilisé, résistance de comparaison de 100 000 ohms, etc., le tout renfermé dans un coffre en chêne se montant sur trois pieds pliants.

M. J. Carpentier présentait une installation portative avec trépied pliant, composée d'un rhéostat circulaire double avec pont de Wheatstone et d'un galvanomètre Deprez-d'Arsonval réunis dans la même boîte, et une seconde installation, permettant d'appliquer la méthode du galvanomètre étalonné, comprenant un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à microscope avec son shunt, une résistance de 100 000 ohms, un commutateur tournant et une clé de galvanomètre.

VI

# POTENTIOMÈTRES

On sait que les potentiomètres sont actuellement les instruments qui permettent de mesurer avec le plus de précision les tensions et les intensités des courants continus. De même, les mesures de résistances peuvent s'effectuer avec ces instruments presque aussi facilement qu'avec le pont de Wheatstone et avec autant de précision ; pour la mesure de faibles résistances, ils remplacent avec avantage le pont double de lord Kelvin.

**Potentiomètre J. Carpentier.** — Dans cet instrument, exposé par M. J. Carpentier, de Paris, on a réalisé une disposition d'ensemble très pratique et qui offre l'avantage de prévenir toute chance d'erreur dans les manipulations.

La résistance du circuit potentiométrique reste parfaitement constante lorsqu'on fait varier celle du circuit de compensation qui le shunte partiellement.

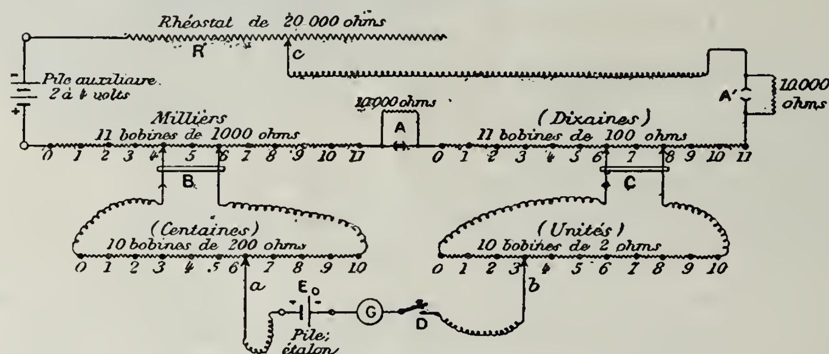



Fig. 167. — Principe du potentiomètre Carpentier.

Cette condition, indispensable pour que le tarage une fois effectué se conserve, est réalisée avec le minimum de bobines La figure 167 montre le principe de la disposition adoptée.

Le circuit potentiométrique a une résistance totale voisine de 20 000 ohms, pouvant être portée à 40 000 ohms, lorsque la pile constante auxiliaire a deux éléments au lieu d'un.

Ce circuit comprend, comme partie invariable, une série B de 11 bobines de 1 000 ohms, une série C de 11 bobines de 10 ohms et une bobine de 10 000 ohms qu'on peut intercaler en A, entre les séries B et C, ou en A' extérieurement à ces séries.

La partie variable du circuit potentiométrique est constituée par un rhéostat R de 20 000 ohms, dont la résistance utilisée peut varier ohm par ohm.

La série B est munie d'un curseur bipolaire B qui permet de shunter deux bobines consécutives quelconques par une série de 10 bobines de 200 ohms.

La résistance totale de la série B est ainsi ramenée à 10 000 ohms au lieu de 11 000.

La même disposition se retrouve pour la série C, dont deux bobines consécutives sont toujours shuntées par un ensemble de 10 résistances de 2 ohms.

La résistance totale de la série C se réduit donc à 100 ohms.

Le circuit de compensation comprend, montés en série, la pile étalon $E_0$, le galvanomètre G et l'interrupteur à clé D. Il est dérivé par les curseurs B, C sur le circuit potentiométrique. Entre les points B et C, la résistance peut varier ohm par ohm, depuis 0 jusqu'à 20 000 ohms.

Voici comment s'obtient cette variation :

En agissant sur le curseur *b*, on introduit les résistances par unités jusqu'à 10 ohms. Le curseur C permet les variations par dizaines, le curseur *a* par centaines et le curseur B par milliers d'ohms.

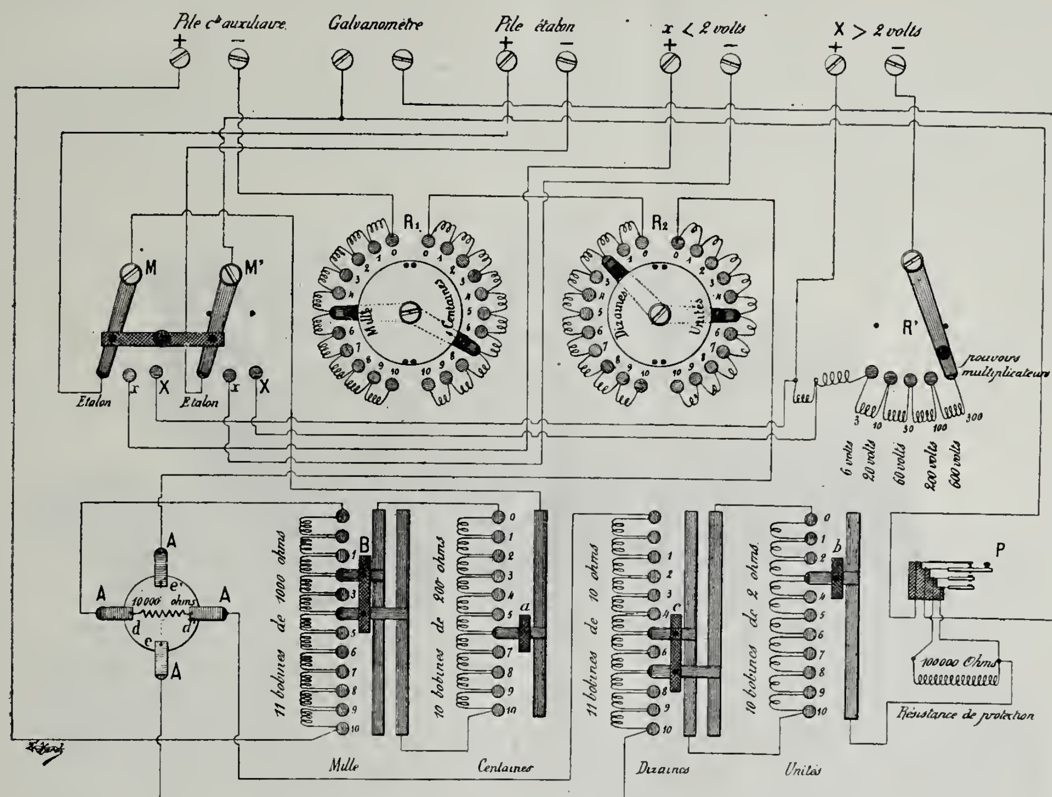



FIG. 168. — Schéma des connexions du potentiomètre Carpentier.

La variation par dizaines de mille est obtenue par la manœuvre de la cheville placée en A ou A'.

Quand on enfonce la cheville en A, la résistance comprise entre les extrémités B, C du circuit de compensation peut atteindre 10 100 ohms et on peut, lorsque l'instrument est taré, mesurer toute tension comprise entre 0 et 1 volt à 0,0001 près.

Si la cheville est introduite en A', la résistance entre B et C peut aller jusqu'à 20 100 ohms et la mesure de tensions comprises entre 1,00 et 2,00 volts peut se faire avec la même approximation que dans le cas précédent.

La disposition qui consiste à shunter deux bobines consécutives quelconques d'une des séries B et C, par un groupe de bobines de même résistance, est celle du pont de Thomson-Varley.

Elle procure l'invariabilité de résistance du circuit potentiométrique, malgré le déplacement des curseurs B, *a*, C, *b*, et cela avec 43 bobines seulement dans l'appareil Carpentier.

La figure 168 montre le schéma des connexions du potentiomètre Carpentier.

Le rhéostat, variable ohm par ohm, est représenté par $R_1$, $R_2$. Il se compose de quatre séries de résistances de 1 000, 100, 10 et 1 ohm, aboutissant à des plots disposés en cadrans sur lesquels glissent des manettes à contacts. La bobine de 10 000 ohms est fixée sur le plateau mobile d'un commutateur AA, A'A', qui peut tourner de 90° dans un sens ou dans l'autre.

Cette bobine relie les frotteurs *d*, *d'*, tandis que ceux marqués *e*, *e'* sont en communication directe.

Il suffit donc d'une rotation d'un quart de tour du commutateur pour que la bobine de 10 000 ohms se trouve intercalée en A ou en A'.

La résistance aux bornes de laquelle est branché le circuit de compensation s'apprécie facilement en observant le commutateur AA' et la position des divers curseurs, en suivant l'ordre A, B, *a*, C, *b*, qui correspond en ohms aux dizaines de mille, milliers, centaines, dizaines et unités.

P est la clé du galvanomètre ; elle est à contacts successifs. Au repos, la clé est relevée ; elle met le galvanomètre en court-circuit, ce qui est commode pour maintenir le spot lumineux au zéro, lorsque le galvanomètre est du système Deprez-d'Arsonval. Le court-circuit cesse dès qu'on appuie sur la clé P.

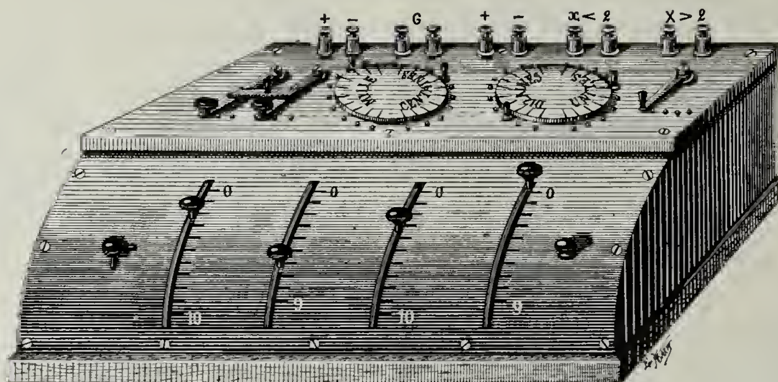



Fig. 169. — Potentiomètre Carpentier.

Si on l'abaisse incomplètement, le galvanomètre se trouve intercalé dans le circuit de compensation, mais à travers une résistance de 100 000 ohms, dite *résistance de protection.*

On évite par ce moyen de détériorer la pile étalon en la laissant débiter, lorsque le réglage du circuit de compensation n'est pas encore parfait. La résistance de protection est mise, d'ailleurs, en court-circuit lorsque la clé P est abaissée à fond.

Le commutateur bipolaire MM', à manettes attelées, sert à introduire dans le circuit de compensation l'élément étalon, une différence de potentiel inconnue $x$ inférieure à 2 volts ou, enfin, une autre X supérieure à 2 volts.

Dans ce dernier cas, la source X débite sur une résistance R' dont une fraction déterminée est branchée sur le commutateur MM'.

Les plots sur lesquels glisse la manette du commutateur R' portent, en chiffres gravés, les facteurs par lesquels il faut multiplier la tension indiquée par le potentiomètre pour avoir la valeur de X. Ces facteurs sont 3, 10, 30, 100 et 300.

Le potentiomètre permettant d'apprécier directement toute tension jusqu'à 2 volts, on place la manette du réducteur R' :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sur le plot | 3 | pour X inférieur à | $3 \times 2 =$ | 6 volts |
| — | 10 | — | $10 \times 2 =$ | 20 — |
| — | 30 | — | $30 \times 2 =$ | 60 — |
| — | 100 | — | $100 \times 2 =$ | 200 — |
| — | 300 | — | $300 \times 2 =$ | 600 — |

La résistance totale du réducteur de tension R′ est exactement de 300 000 ohms et la fraction comprise entre les plots + X, — X du commutateur est nécessairement alors de 1 000 ohms.

Comme l'indique la figure 167, la pile constante auxiliaire, le galvanomètre, la pile étalon et la source $x$ ou X, dont on veut mesurer la tension, se branchent entre les bornes repérées qui leur sont réservées, en ayant bien soin de respecter les polarités marquées sur ces bornes.

Comme pile auxiliaire, on emploie un ou deux accumulateurs ayant donné leur coup de fouet par une décharge partielle préalable.

La figure 169 montre l'aspect extérieur du potentiomètre J. Carpentier. Les manettes des rhéostats $R_1$, $R_2$ sont placées à la partie supérieure sur la planchette horizontale de l'instrument qui ressemble un peu à une machine à calculer. Sur cette partie en ébonite, on voit également le commutateur bipolaire, le réducteur de tension et les diverses bornes.

La partie antérieure est recouverte d'une tôle oxydée qui laisse passer la manette du commutateur de la bobine de 10 000 ohms, les poignées des quatre curseurs B, $a$, C, $b$ et le bouton P de la clé du galvanomètre.

Cette séparation complète des organes relatifs aux circuits potentiométriques et de compensation est très heureuse. Une fois le tarage effectué, il suffit de manœuvrer les curseurs dont les poignées se déplacent dans des rainures munies de chiffres qui indiquent les résistances correspondant à leur position. On n'est pas exposé de la sorte à toucher intempestivement aux rhéostats $R_1$, $R_2$, ce qui obligerait à recommencer le tarage.

**Potentiomètre Chauvin et Arnoux.** — Le potentiomètre portatif exposé par MM. Chauvin et Arnoux, de Paris, est de dimensions très réduites. La figure 170 en montre la vue d'ensemble et la figure 171 donne le schéma des connexions.




Fig. 170. — Potentiomètre Chauvin et Arnoux.

Le circuit potentiométrique, sur lequel débite un accumulateur, comprend :

1° Un fil $xy$ en acier-nickel Guillaume, sur lequel peut glisser le curseur D ;

2° Un fil calibré AA′ de 0,50 m de long, sur lequel on déplace le curseur P, dont l'index $i$ se présente devant les divisions d'une règle Q, la règle étant divisée en 1 000 parties. Lorsque l'instrument est taré, la chute de tension est de 0,1 volt pour les 1 000 divisions du fil, soit de 0,0001 volt par division ;

3° Une série de 15 bobines ayant chacune la même résistance que le fil calibré. Un curseur $C_1$ les met en relation avec la barre R ;

4° Une série de 7 bobines identiques aux précédentes et que le curseur $C_2$ relie à la barre S.

En B se trouve le galvanomètre du genre Deprez-d'Arsonval dont l'aiguille, mobile entre deux repères, s'observe au moyen de la loupe K.

N est un commutateur qui permet d'intercaler dans le circuit de compensation, soit l'une des deux piles étalons $1p$ ou $2p$, soit la source de tension inconnue.

Lorsque cette tension dépasse 16 volts, on fait usage du réducteur de tension VM, dont la résistance totale est de 100 000 ohms et qui permet de mesurer jusqu'à 1 600 volts. Le circuit du potentiomètre est alors dérivé sur une fraction (160 ohms) des 100 000 ohms.

Cette résistance se retire automatiquement du circuit au moyen du commutateur $a_1 c_1 d_1$ lorsque, mesurant de faibles tensions, on amène le curseur M à gauche, jusqu'en $a$.

Le potentiomètre ne comporte pas de résistance de protection. Pour fermer le circuit de compensation, on maintient abaissée la clé F, après avoir convenablement orienté le commutateur N.

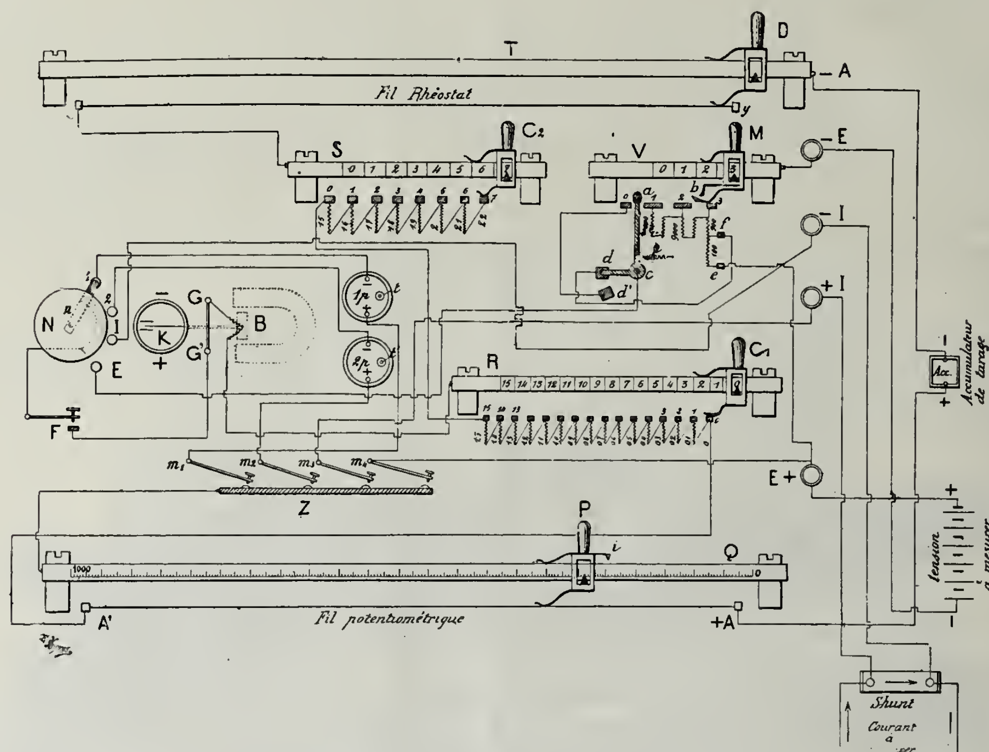



Fig. 171. — Schéma des connexions du potentiomètre Chauvin et Arnoux.

On appuie ensuite par petits à-coups sur l'une des clés $m_1$, $m_2$, $m_3$ ou $m_4$.

La tension inconnue se relie aux bornes + E, — E.

Les bornes + I, — I aboutissent à celles d'un shunt, dans lequel circulent les courants dont on veut mesurer l'intensité, tandis que la pile auxiliaire est branchée entre les bornes + A, — A.

Il est à noter que la règle Q porte une seconde échelle, dite de correction de température.

Avant de tarer le potentiomètre, on amène l'index $i$ devant la température marquée sur cette échelle, après avoir observé le thermomètre des éléments Clark $1p$, $2p$.

Le tarage s'obtient en plaçant les curseurs $C_1$, $C_2$ sur les plots qui indiquent les deux premières décimales de la tension étalon. On agit sur le rhéostat D de manière à annuler les déviations du galvanomètre.

Supposons que, dans une mesure de tension inconnue, appliquée aux bornes + E, — E, on soit arrivé à l'équilibre du galvanomètre en plaçant le réducteur M sur le plot 2, les curseurs $C_1$, $C_2$ sur les plots 15 et 0 et le curseur P devant la division 364.

On écrira le nombre 1,5364 et on déplacera la virgule de deux rangs vers la droite, le réducteur M indiquant ce nombre de rangs. On obtiendra alors le nombre 153,64, qui indique en volts la tension cherchée.

**Potentiomètre Carrenza.** — Cet instrument, étudié pour la marine espagnole par M. Carrenza, est construit en France par la maison Breguet qui l'avait exposé.

La figure 172, qui montre les détails de construction, fait voir que la résistance du circuit potentiométrique est entièrement constituée par un fil calibré roulé en hélice sur un cylindre isolant.

Le fil est en métal spécial, dont la résistivité très considérable est de 85 microhms-centimètre et dont le coefficient de variation de température est seulement de 0,000867 ; son diamètre est de 0,35 mm.

Ce fil est logé dans une rainure hélicoïdale, pratiquée sur le cylindre isolant, de façon à n'être que partiellement encastré.

Parallèlement au cylindre se trouve une vis micrométrique de même pas que l'enroulement du fil.

Le cylindre et la vis sont réunis par un train d'engrenages qui permet de les faire tourner à la même vitesse; sur la vis est disposé un écrou muni de guides pour la translation d'un contact à ressort qui peut être embrayé ou débrayé, suivant que l'on veut donner au chariot porte-contact des déplacements lents ou rapides.

Fig. 172. — Schéma des connexions du potentiomètre Carrenza.

Fig. 173. — Tarage du potentiomètre Carrenza.

Au-dessus du cylindre est une règle graduée dont les divisions correspondent au nombre de spires qu'il comporte.

De plus, l'axe du cylindre est muni d'une aiguille mobile devant les divisions d'un cadran indiquant les fractions de spire.

Le contact possède un ressort destiné à limiter la pression exercée sur le fil calibré lorsqu'on appuie sur le bouton de manœuvre de ce contact.

L'ensemble est complété par des connexions aboutissant à une série de bornes étiquetées, ce qui rend très aisée la mise en service de l'instrument, tout en évitant les erreurs de groupement.

D'ailleurs, des fils fusibles sont disposés sur le trajet du circuit, lorsque l'appareil est soumis à une tension élevée.

Pour graduer le potentiomètre, on opère comme suit : le fil calibré AA' du potentiomètre (*fig.* 173) est monté en série avec un rhéostat de réglage d'une centaine d'ohms, indépendant de l'instrument; dans ce circuit on fait débiter une pile constante donnant environ 2 volts.

On dispose en G un galvanomètre sensible, une clé C et un élément Latimer-Clark $E_0$.

Soit 1,434 volt sa force électromotrice, toute correction de température effectuée. On amène le contact mobile devant la division 143 de la règle, qui correspond à 143 spires du cylindre. L'aiguille de ce dernier est placée sur la division 4 du cadran qui correspond à 0,4 spire. Le fil potentiométrique comprend donc 143,4 spires, soit $10^2$ fois la tension de l'élément Latimer-Clark. Il ne reste plus qu'à manœuvrer le rhéostat $r$ jusqu'à ce qu'en abaissant la clé du galvanomètre ce dernier reste au zéro.

Le potentiomètre est ainsi gradué et l'on peut, en plaçant en $E_x$ une différence de potentiel inconnue (inférieure à 2 volts), en déterminer la valeur.

Pour cela, on ne touche plus au rhéostat $r$ et l'on enlève la pile étalon $E_0$. On fait tourner le cylindre jusqu'à ce qu'en appuyant sur le bouton du chariot porte-contact, le galvanomètre reste au zéro. Il reste à lire le nombre de spires et les fractions de spire indiqués sur la règle et sur le cadran.

Supposons qu'on ait trouvé, par exemple, que la règle marquait 115 spires et le cadran 0,7 spire : c'est que la tension inconnue a pour valeur $115{,}7.10^{-2} = 1{,}157$ volt.

Le cylindre comportant 200 spires, on peut mesurer directement des tensions inférieures à 2 volts.

Lorsqu'on veut mesurer des tensions supérieures à 2 volts et comprises, par exemple, entre 2 et 150 volts, on les fait débiter sur une résistance de 100 000 ohms. On amène au potentiomètre, en $E_x$, une dérivation prise aux bornes des 1 000 premiers ohms de la résistance précédente.

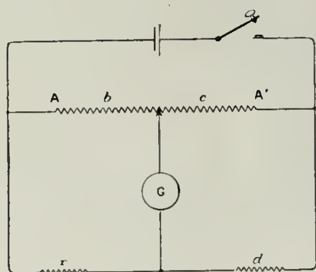



Fig. 174. — Dispositif employé pour mesurer les résistances avec le potentiomètre Carrenza.

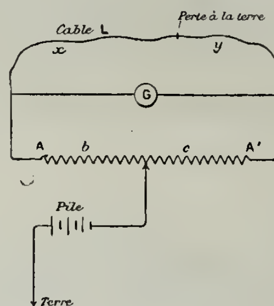



Fig. 175. — Emploi du potentiomètre Carrenza pour déterminer les pertes à la terre dans un câble.

La tension, mesurée comme précédemment, devra nécessairement être multipliée par 100.

Les mesures d'intensité s'effectuent par la méthode indirecte, en déterminant avec le potentiomètre la chute de tension qui se produit aux bornes d'un shunt de 0,001 ohm, traversé par le courant à mesurer.

Pour mesurer des résistances et des isolements, on emploie la méthode du pont de Wheatstone. Le potentiomètre de Carrenza peut être utilisé à cet effet, et il n'est même plus besoin de le graduer.

On place en $x$ la résistance à mesurer et en $d$ une résistance connue et du même ordre de grandeur. Le galvanomètre étant branché en $b$, comme l'indique la figure 174, on déplace le chariot porte-contact jusqu'à ce qu'en appuyant sur la clé $c$ le galvanomètre reste au zéro.

Il ne reste plus qu'à appliquer la relation bien connue :

$$x = d\frac{b}{c};$$

$b$ est indiqué par le potentiomètre et $c = n - b$, $n$ étant le nombre total des spires du cylindre.
On peut encore utiliser le potentiomètre de Carrenza pour déterminer la position d'une perte à la terre existant dans un câble de section constante.

Il suffit de réaliser le montage indiqué par la figure 175. Soit $l$ la longueur du câble et $x$ la distance du défaut à l'une des extrémités de ce câble. On a, lorsque le galvanomètre reste au zéro :

$$x = l\frac{b}{b+c} = l\frac{b}{n}.$$

La distance $y$ du défaut à l'autre extrémité du câble serait de même :

$$y = l\frac{n}{b}.$$

**Potentiomètre Hartmann et Braun.** — Cet instrument (*fig.* 176), construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, de Francfort (Allemagne), se compose d'un circuit potentiométrique $RCK_1LK_2$ (*fig.* 177) aboutissant aux bornes + B, — B, auxquelles on relie la source dont on veut déterminer la tension ou, suivant les cas, une pile auxiliaire.

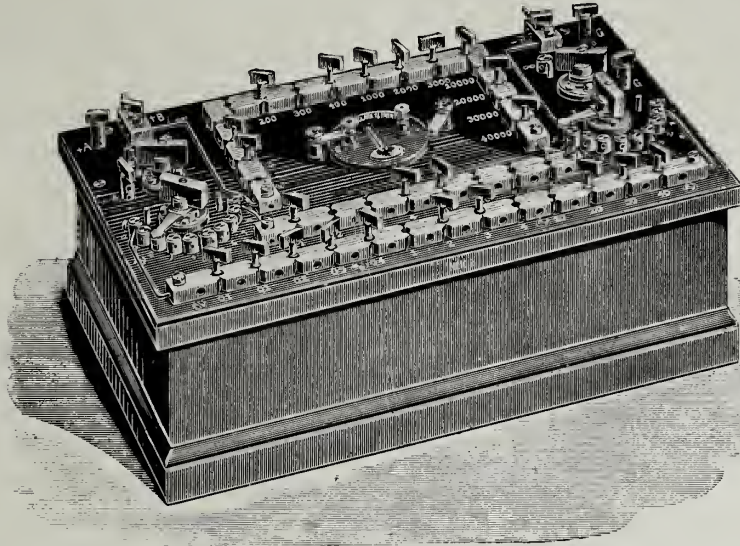


Fig. 176. — Potentiomètre Hartmann et Braun.

La partie R, formée d'une boîte de résistances à chevilles, peut atteindre 111 100 ohms.

La branche C a 110 ohms, la série $K_1$ comprend 9 bobines de 100 ohms, la branche L a 111,1 ohms et, enfin, la série $K_2$ se compose de 9 bobines de 1 000 ohms.

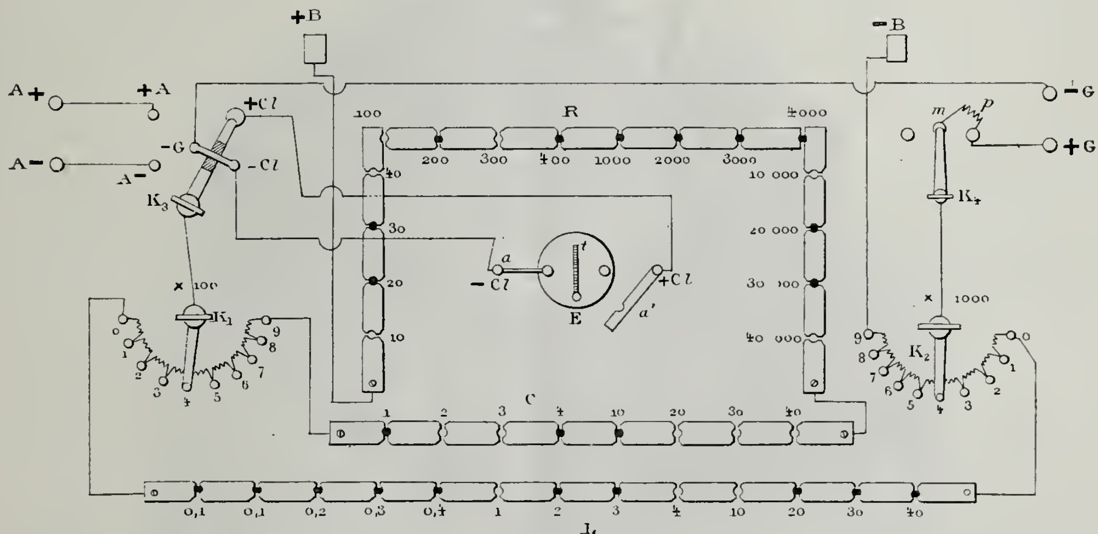



Fig. 177. — Schéma des connexions du potentiomètre Hartmann et Braun.

Les branches C et L sont *complémentaires*, c'est-à-dire que toute cheville retirée de C doit être reportée entre les plots correspondants de L et inversement.

La résistance maximum comprise entre + B et — B peut donc être, au total, de 121 111,1 ohms.

Le circuit de compensation comprend le galvanomètre, branché en + G, — G, et la pile étalon Clark, reliée aux bornes + Cl, — Cl. Cet ensemble aboutissant aux manettes de $K_1$ et de $K_2$ peut, par conséquent, être dérivé sur un maximum de 10 000 ohms, variable par dixième d'ohm et pris sur le circuit potentiométrique.

La manette $K_3$ permet d'intercaler l'élément Clark ou de lui substituer une source de tension branchée entre + A et — A.

La manette $K_4$ sert à introduire le galvanomètre en circuit, en passant, au préalable, à travers une résistance de protection $p$ de 100 000 ohms.

La disposition complémentaire des branches C et L a pour objet de permettre toutes les variations de résistance comprises entre les extrémités du circuit de compensation sans que la résistance du circuit potentiométrique en soit affectée. Cette disposition est nécessaire pour ne pas modifier le tarage lorsqu'on fait une série de mesures.

L'élément Clark E est placé dans la caisse de l'instrument; mais on peut l'enlever et l'employer à d'autres usages.

Cet élément est muni d'un thermomètre grâce auquel on corrige aisément la valeur de la force électromotrice en fonction de la température. C'est pour tenir compte de cette correction que la branche L comprend des résistances de 0,1 à 0,4 ohm que ne comporte pas la branche C

Le commutateur $K_3$ est formé d'une lame élastique dont l'axe de rotation est en $K_3$ et qui sert à relier successivement ce point aux plots + Cl et — A.

Une petite lame élastique transversale, isolée de la précédente, mais solidaire de ses mouvements, fait communiquer en même temps le plot — G aux plots — Cl ou + A.

Ce potentiomètre permet de mesurer toutes tensions comprises entre 0,014 et 1 400 volts.

Pour les mesures d'intensité de courant, on emploie la méthode de la chute de tension, en utilisant des shunts étalonnés intercalés dans les circuits étudiés. Avec des shunts convenables, l'étendue des mesures d'intensité va de 0,1 milliampère à 1 000 ampères.

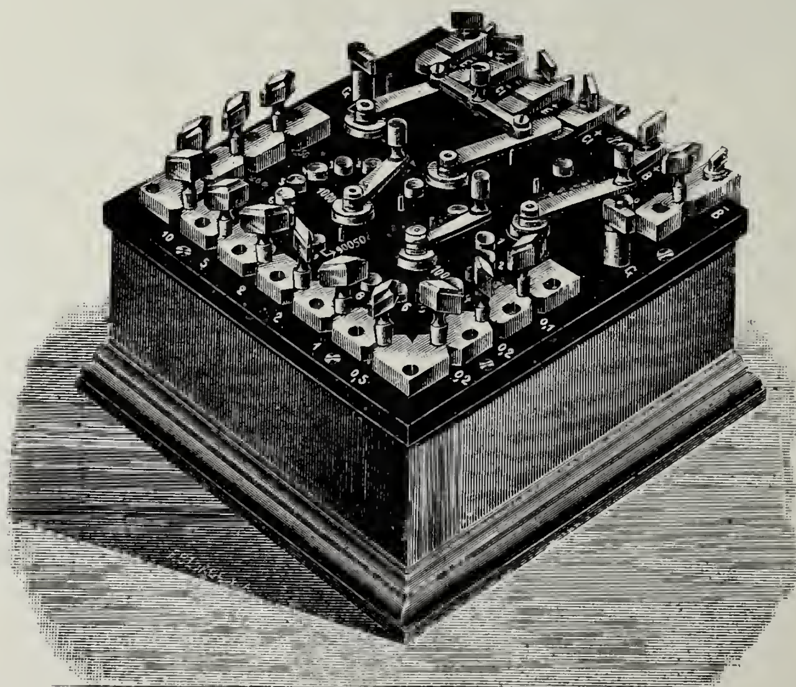


Fig. 178. — Potentiomètre Keiser et Schmidt.

**Potentiomètre Keiser et Schmidt.** — Dans cet instrument (*fig.* 178), construit et exposé par MM. Keiser et Schmidt, de Berlin (Allemagne), on retrouve quelques dispositions du potentio-

mètre Hartmann et Braun, ces divers instruments étant établis d'après les types étudiés par M. Feussner à l'Institut de Charlottenbourg.

La figure 179 donne le schéma des connexions.

Le circuit potentiométrique a une résistance totale de 90 050 ohms, dont 80 000 sont branchés entre les plots — B et + B.

Le circuit de compensation, qui se termine par les manettes $K_1$ et $K_2$, peut être dérivé sur les résistances disposées en cadrans $D_1$ et $D_2$ et sur la rangée R.

Ces résistances varient, au besoin, par fraction de 0,1 ohm et valent en totalité 10 000 ohms.

La pile étalon se relie aux bornes + Cl, — Cl et les tensions à mesurer en + E, — E, lorsqu'elles sont inférieures à 10 volts ; *mm'* est le commutateur bipolaire employé dans les appareils

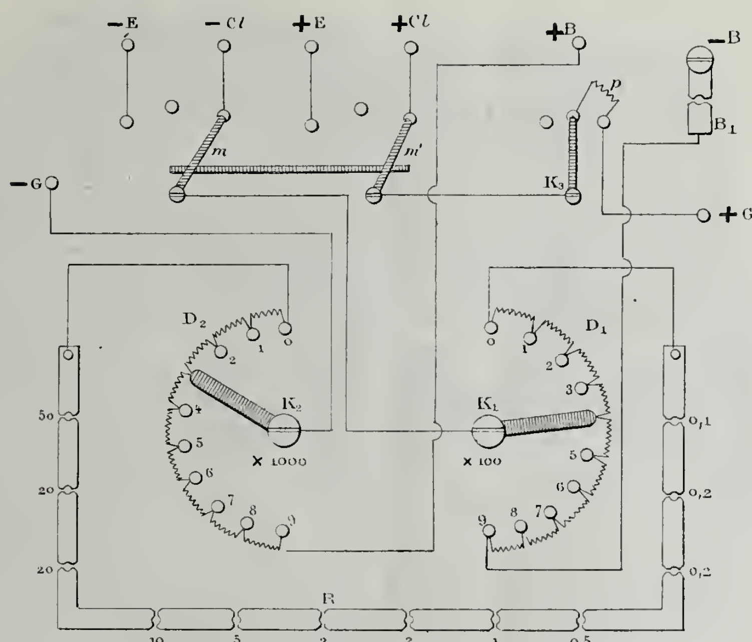



Fig. 179. — Schéma des connexions du potentiomètre Keiser et Schmidt.

déjà décrits et $K_3$ est l'interrupteur du galvanomètre. Une résistance *p*, de 100 000 ohms, protège l'élément étalon.

Pour tarer le potentiomètre Keiser et Schmidt, on dispose les manettes $K_1$, $K_2$ et les chevilles en R, de façon à intercaler entre les points $K_1$, $K_2$ une résistance égale à 1 000 fois la tension de la pile étalon, toutes corrections de température effectuées.

On opère comme avec les appareils précédents, en branchant entre les bornes + B, — B la batterie auxiliaire de piles constantes.

Les tensions se mesurent à partir de 0,01 volt et jusqu'à 200 volts sans faire intervenir de résistances supplémentaires.

Avec les résistances supplémentaires, il est possible de mesurer jusqu'à 1000 volts.

Si on emploie une série convenable de shunts, on peut mesurer les intensités comprises entre 0,001 et 1 000 ampères.

L'approximation atteint 0,1 0/0.

**Potentiomètre Otto Wolff.** — La maison Otto Wolff est le constructeur attitré de l'Institut physico-technique de Charlottenbourg ; aussi ce potentiomètre (*fig.* 180) est-il le véritable type du potentiomètre officiel allemand. Il se compose de cinq séries de résistances disposées en cadrans, comme le montre la figure 181 donnant le schéma des connexions.

Les cadrans A, A′ sont simples et contiennent : le premier, 14 bobines de 1 000 ohms, et le second, 9 bobines de 100 ohms. Les trois autres séries sont formées de cadrans doubles CC′, DD′, EE′. Chaque cadran possède 9 bobines qui ont 10 ohms pour les cadrans CC′, 1 ohm pour les cadrans DD′ et 0,1 ohm pour les cadrans EE′. Les deux manettes de chaque cadran double sont isolées l'une de l'autre, mais manœuvrées simultanément. De cette façon toute résistance ajoutée en C est retirée en C′ ; le même fait se produit pour celles des cadrans DD′, EE′.

Cette disposition a pour objet de maintenir constante la résistance totale comprise entre les points + B, — B, malgré les variations de la résistance du circuit de compensation relié aux secteurs *a*, *a′* des cadrans simples A, A′.

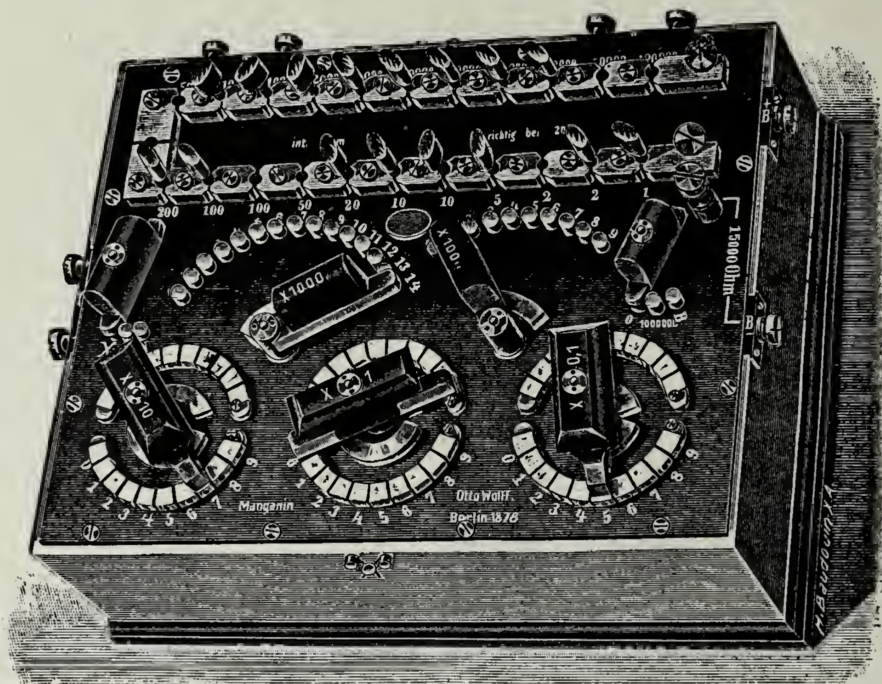



Fig. 180. — Potentiomètre Otto Wolff.

Entre les points + B, — B, la résistance est invariable et comprend, par suite, 14 bobines de 1 000 ohms, 9 bobines de 100 ohms et 9 bobines de 10 ohms, 9 de 1 et 9 de 0,1 ohm, soit, au total, 14 999,9 ohms. Quant aux bobines de 10, 1 et 0,1 ohms, celles qui ne sont pas empruntées aux cadrans inférieurs le sont aux cadrans supérieurs et inversement.

La résistance du circuit de compensation peut aussi atteindre 14 999,9 ohms ; mais elle est susceptible de varier par fractions de 0,1 ohm.

Lorsque le tarage est effectué, la différence de potentiel fournie entre + B et — B par la pile auxiliaire est exactement de 1,49999 volt, ou pratiquement 1,5 volt ; la chute de tension aux bornes de chaque dixième d'ohm est alors de 0,00001 volt.

Le rhéostat R, extérieur au potentiomètre, permet d'arriver toujours au tarage exact en opérant de la façon précédemment décrite.

I est, comme on le voit, le commutateur qui sert à relier le galvanomètre à la pile étalon ou à une source inconnue *x*, inférieure à 1,5 volt, ou enfin à une source X comprise entre 1,5 et 600 volts.

Dans ce dernier cas, la tension inconnue est branchée entre les bornes + X et — X d'un réducteur ayant une résistance de 300 000 ohms.

G est l'interrupteur du galvanomètre, et P la résistance de protection.

Fig. 181. — Schéma des connexions du potentiomètre Otto Wolff.

On remarquera que les cadrans C, D, E sont montés en série, entre les cadrans A, A′; ils font donc partie du circuit de compensation.

Les cadrans C′, D′, E′ sont extérieurs aux points $a$, $a'$ et appartiennent au circuit potentiométrique.

En réalité, lorsqu'on fait les mesures, les lectures ne portent que sur les cadrans AA′,CDE.

Pour ne pas commettre d'erreur, il faut se rappeler qu'il n'y a pas de lecture à effectuer sur les cadrans C′, D′, E′. A cet effet, le constructeur a supprimé les chiffres relatifs à ces cadrans; nous ne les avons fait figurer sur le schéma que pour mieux faire comprendre l'artifice employé pour maintenir constante la résistance du circuit potentiométrique.

La disposition dérivée du pont de Thomson-Varley paraît cependant préférable, car elle permet d'économiser un certain nombre de bobines dont l'étalonnage précis est nécessairement coûteux.

**Potentiomètre Siemens et Halske.** — Dans ce potentiomètre, combiné par le Dr Raps et que représentent les figures 182 et 183, on a également employé la disposition du pont de Thomson-Varley afin de réduire le nombre des bobines.

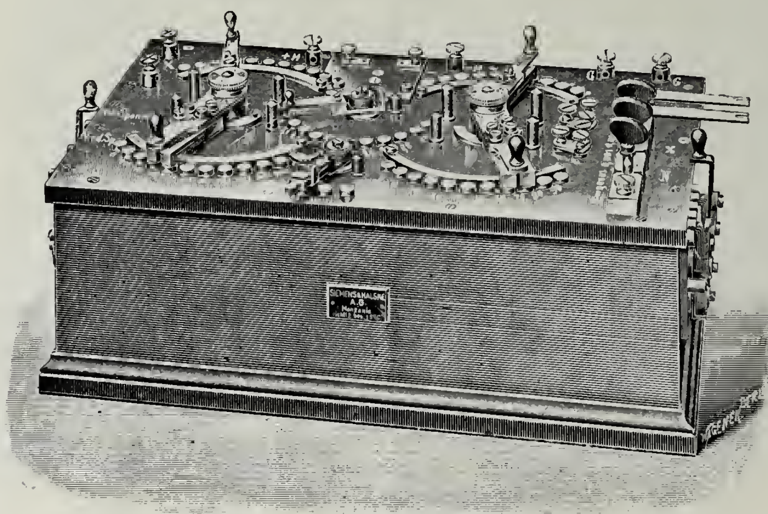


Fig. 182. — Potentiomètre Siemens et Halske.

Entre deux quelconques des 10 bobines de 1 000 ohms de la série K (*fig.* 183), on dérive une résistance fixe, formée de 9 bobines de 100 ohms, dont l'ensemble, soit 900 ohms, aboutit aux deux frotteurs dont se compose la manette K.

La série K, ainsi shuntée, présente donc une résistance réduite de 9 900 ohms.

La série $K^2$, qui comprend 10 bobines de 10 ohms, a de même l'une quelconque de ses bobines shuntée par 9 bobines de 1 ohm. Une série B de 9 bobines de 0,1 ohm complète cet ensemble, dont la résistance totale, de 10 000 ohms, constitue le circuit potentiométrique.

Le circuit de compensation peut varier de 0,1 à 10 000 ohms, par dixième d'ohm; il aboutit aux manettes $K^1$, $K^3$.

La pile auxiliaire se place entre les bornes + H et — H et la pile étalon en W.

Cette pile est dérivée sur l'une des résistances marquées 10 200, 1 020, 102, en enlevant la cheville de l'une de ces résistances.

De cette manière et tout en ne faisant pas débiter la pile étalon, on oppose une fraction plus ou moins grande de sa tension (1,02 volt) aux points $K^1$, $K^3$, auxquels aboutit le circuit de compensation.

Suivant les cas, la chute de tension aux bornes de chaque dixième d'ohm est donc de 0,0001, de 0,001 ou de 0,01 volt.

Comme toujours, on ne ferme le circuit de compensation qu'au travers d'une résistance de protection ; elle est ici intercalée entre les plots de l'interrupteur T, qui porte une petite clé à contact, nommée *tâteur*. Pour les mesures de faibles tensions, on réunit directement les bornes A, A', terminées par des bandes de connexions qui servent à relier les bornes A, A' à travers une résistance de 150 000 ohms, lorsqu'on applique en + X, — X des tensions élevées.

Dans ce dernier cas, on dispose les commutateurs L, L', U, de manière à réaliser la combinaison indiquée en traits forts sur la figure 183.

Les connexions en traits fins sont relatives à la mesure des faibles tensions et au tarage du potentiomètre. On remarquera que certaines connexions sont communes dans les deux cas ; elles ont été représentées, à cet effet, par des traits fins longeant les traits forts.

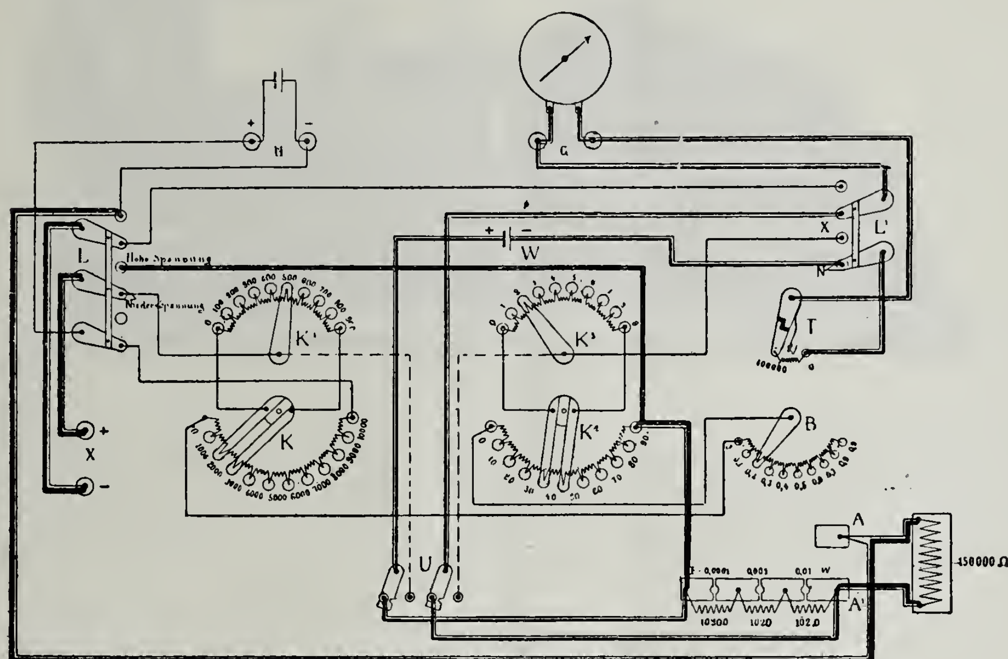



Fig. 183. — Schéma des connexions du potentiomètre Siemens et Halske.

La pile étalon est l'élément Weston, au cadmium ; il est logé dans la caisse du potentiomètre.

Les mesures de tensions peuvent s'effectuer entre 0,0001 et 1 500 volts si l'on se sert du rhéostat intercalé entre les bornes A, A'.

**Potentiomètre Crompton.** — Cet appareil est représenté, dans son ensemble, par la figure 184, accompagné de tous ses accessoires, boîte auxiliaire, pile étalon, galvanomètre et échelle transparente.

La figure 185 indique les connexions du potentiomètre, qui comprend :

1° Un fil calibré 0 — 100 d'environ 63 cm de long, tendu au-dessus d'une règle divisée en 1 000 parties et le long de laquelle se déplace un curseur B, portant une clé de contact avec le fil.

Ce dernier, de 0,4 mm de diamètre, a une résistance de 2 ohms et son coefficient de température est négligeable ;

2° En série avec le fil calibré, sont disposées 14 bobines O à A de 2 ohms chacune, intercalées entre les plots d'un commutateur à manette.

La résistance fixe du circuit potentiométrique est de 30 ohms. Elle est complétée par un rhéostat qui en forme la partie variable. La pile constante auxiliaire est branchée entre les extrémités du circuit potentiométrique et le rhéostat est réglé pendant le tarage de façon que la chute de tension aux bornes de l'ensemble du fil calibré et des 14 bobines de 2 ohms soit exactement de 1,5 volt. La différence de potentiel aux extrémités du fil est alors 0,1 volt et à chacune des 1 000 divisions correspond 0,0001 volt.

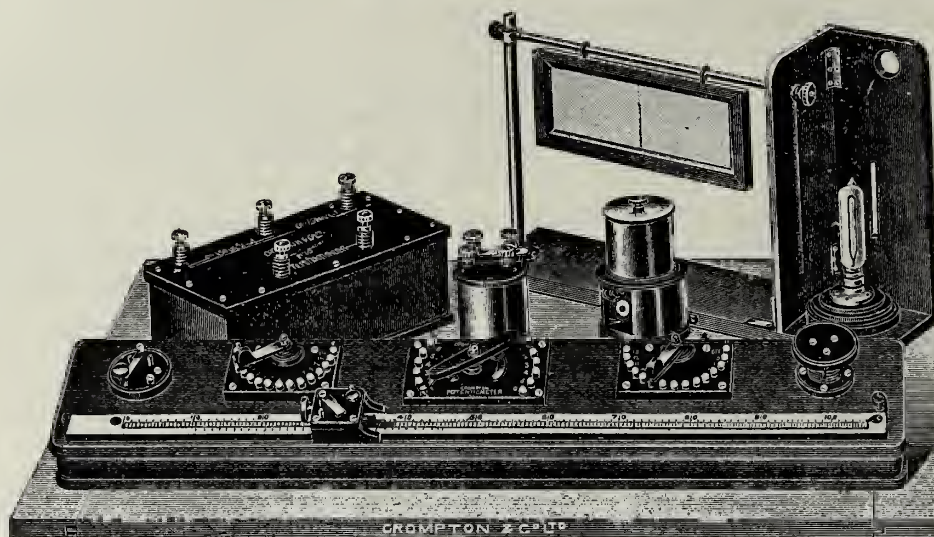



Fig. 184. — Potentiomètre Crompton.

Le circuit de compensation comprend le galvanomètre G et la pile étalon qui se branche entre le curseur B et la manette du commutateur des 14 bobines.

Soit 1,434 volt la force électromotrice de la pile étalon. On place la manette du commutateur sur le plot 14 et le curseur devant la division 340 de la règle.

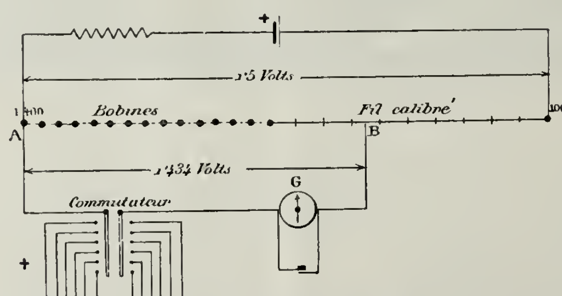



Fig. 185. — Schéma des connexions pour le tarage du potentiomètre Crompton.

Il ne reste plus qu'à agir sur le rhéostat jusqu'à ce qu'en appuyant sur la clé du curseur le galvanomètre reste au zéro.

Pour mesurer une tension inconnue, inférieure à 1,5 volt, on la substitue à la pile étalon, au moyen d'un commutateur multiple, et on ramène le galvanomètre au zéro en agissant sur le commutateur à 14 bobines et sur le curseur B.

Si, comme le montre la figure 186, le commutateur a dû, pour cela, être amené sur le plot 4 et le curseur devant la division 500, c'est que la tension X = 0,450 volt.

Lorsqu'on veut mesurer des tensions supérieures à 1,5 volt, on emploie la boîte de résistances auxiliaires qui sert de réducteur de tension.

Cette boîte porte cinq bornes, les deux bornes situées en avant se reliant au potentiomètre.

Quant aux trois bornes situées en arrière, on les utilise de la façon suivante :

Si la source de tension inconnue est inférieure à 150 volts, on la branche entre la borne de gauche et celle du milieu.

On emploie, au contraire, les bornes de gauche et de droite, pour les tensions allant jusque 750 volts.

Les mesures d'intensité se font par la méthode du shunt étalonné.

Les divers organes du potentiomètre sont disposés sur une caisse avec dessus en marbre.

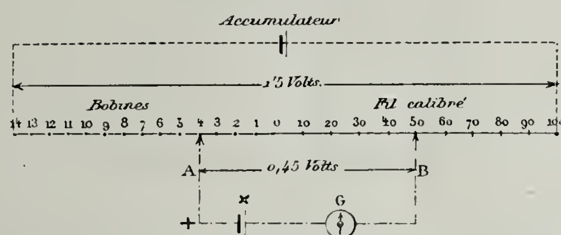



Fig. 186. — Schéma des connexions pour la mesure de faibles tensions avec le potentiomètre Crompton.

On trouve successivement à partir de la gauche (*fig.* 184) :

1° L'interrupteur de la pile auxiliaire ;

2° Le commutateur du rhéostat de réglage ;

3° Un commutateur bipolaire à quatre directions qui sert à brancher sur le circuit de compensation la pile étalon, une source $x$ de tension inférieure à 1,5 volt, les bornes d'un shunt étalonné ou les bornes antérieures de la boîte de résistances auxiliaires ;

4° Le commutateur des 14 bobines de 2 ohms ;

5° Un petit rhéostat supplémentaire de réglage, placé en série avec le premier et destiné à en fractionner les variations.

---

VII

# WATTMÈTRES

———

### WATTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE

**Wattmètre Blondlot-Curie.** — L'électromètre Blondlot et Curie, déjà décrit[1], peut être utilisé comme wattmètre.

Sous l'influence des charges dues aux deux différences de potentiel appliquées $U_1$ et $U_2$, le disque mobile dévie malgré le couple antagoniste produit par les fils de suspension. La déviation est proportionnelle au produit des différences de potentiel $U_1$ et $U_2$, et on a :

$$\alpha = cU_1U_2,$$

$c$ étant une constante et $\alpha$ la déviation.

Il est à remarquer que, si les tensions $U_1$, $U_2$ sont périodiques, les déviations sont indépendantes de la forme des courbes et de la différence de phase de ces tensions. C'est à cause de cette propriété que l'appareil peut servir de wattmètre.

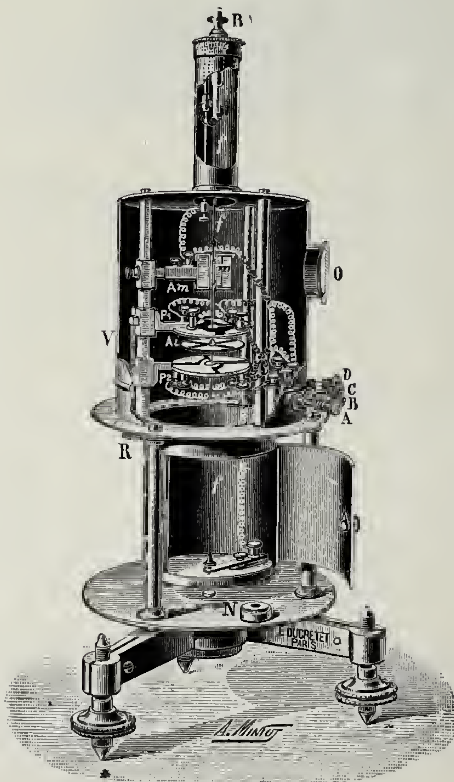


Fig. 187. — Wattmètre électrostatique Blondlot-Curie.

Les bornes du circuit dont on veut mesurer la puissance sont reliées en A et B (*fig.* 187).

On intercale, d'autre part, dans ce circuit une résistance R non inductive qui est traversée par le courant principal.

Aux bornes de cette résistance R reliée en C et en D se produit une chute de tension qui agit sur les secteurs du disque mobile A*i*.

La puissance est simplement mesurée par la déviation.

La différence de potentiel en AB est celle de la source qui alimente le circuit; elle peut donc être considérable. Au contraire, la chute de tension dans la résistance R doit être faible, si l'on veut rendre négligeable la puissance dépensée dans cette résistance.

Celle-ci doit cependant avoir une valeur suffisamment grande pour que la déviation soit appréciable.

On peut faire varier la sensibilité de cet instrument en rapprochant ou éloignant du disque

1. Voir, page 36, Electromètre astatique Blondlot et Curie.

mobile $i$ les sections fixes $P_1$, $P_2$. A cet effet, ces derniers sont supportés par une tige verticale à crémaillère.

Le fil de suspension peut être tendu plus ou moins par la manœuvre du bouton $B_0$.

L'amortissement des oscillations est obtenu simplement par l'action d'une palette en aluminium $m$, fixée au fil de suspension supérieur et mobile dans une boîte fermée dans laquelle la palette se meut avec un jeu réduit au minimum.

Une cage métallique V recouvre tous les organes de l'instrument et les met à l'abri des champs électrostatiques extérieurs.

### WATTMÈTRES ÉLECTRODYNAMIQUES

Ce genre de wattmètres est de beaucoup le plus employé; ces instruments dérivent de l'électrodynamomètre.

La bobine mobile est parcourue par un courant proportionnel à la tension du circuit dont on veut mesurer la puissance, tandis que la bobine fixe est traversée par le courant du circuit lui-même.

Les déviations sont proportionnelles au produit des courants, c'est-à-dire à la puissance.

Lorsque les wattmètres doivent servir pour mesurer la puissance de courants alternatifs, il faut que la self-induction de leurs bobines fixe et mobile soit négligeable.

On y arrive en donnant à ces bobines un très petit nombre de spires et en assurant néanmoins une sensibilité suffisante au moyen de dispositions spéciales qui caractérisent chaque instrument.

Il faut aussi que les oscillations de la bobine mobile soient amorties.

Les wattmètres électrodynamiques se divisent en deux catégories :

1° Ceux dans lesquels la bobine mobile occupe toujours la même position par rapport à la bobine fixe;

2° Ceux dans lesquels cette position varie.

Dans le premier cas, il faut toucher à l'instrument pendant les mesures, afin d'équilibrer le couple moteur et de ramener la bobine mobile à sa position de repos.

Dans le second cas, cette manipulation est inutile, l'équilibre se produisant automatiquement. Les wattmètres sont alors à *lecture directe* et peuvent être gradués empiriquement.

**Wattmètre Carpentier à torsion, modèle portatif.** — Cet instrument se compose d'une boîte contenant deux bobines fixes roulées avec du ruban de cuivre de section appropriée et isolé à la soie.

Ces bobines sont couplées en quantité et aboutissent à des blocs placés extérieurement à la boîte et dans lesquels pénètrent les deux fiches, munies de câbles souples, qui servent à intercaler les bobines fixes dans le circuit à essayer.

La bobine mobile, placée dans le champ des bobines fixes, est suspendue par un ressort en boudin qu'on peut tordre de l'extérieur en tournant un bouton moletté.

Ce bouton est solidaire d'un cercle gradué dont les divisions en degrés viennent se présenter devant un repère fixe.

La bobine mobile porte une aiguille qui se déplace entre deux taquets devant un repère également fixe. Ses extrémités aboutissent, l'une à l'entrée des bobines fixes, l'autre à une borne spéciale qui sert à la relier au circuit dont on veut mesurer la puissance, par l'intermédiaire d'une caisse de résistances séparée du wattmètre.

Ces résistances sont bobinées de manière à ne présenter ni self-induction ni capacité ; elles ont un coefficient de température négligeable. Elles sont, d'ailleurs, disposées de manière que leur refroidissement soit bien assuré.

La bobine mobile ne comprend que très peu de spires afin de rendre sa self-induction négligeable et ses oscillations sont rendues apériodiques au moyen d'un amortisseur magnétique.

Pour se servir de l'instrument, il suffit de faire tourner le cercle gradué jusqu'à ce que l'aiguille de la bobine mobile revienne devant son repère. On lit alors le nombre de degrés dont il a fallu faire tourner le cercle gradué et on le multiplie par une constante.

Cet instrument permet de mesurer jusqu'à 45 000 watts sous 150 volts ; il a été principalement étudié pour la vérification sur place des compteurs.

La maison Carpentier exposait également un wattmètre à miroir et un wattmètre à lecture directe.

**Wattmètre du laboratoire Volta.** — Ce wattmètre est construit à peu près comme le voltmètre électrodynamique décrit page 41 et a été étudié par M. Meylan.

La figure 188 représente une vue intérieure et l'aspect extérieur de cet instrument qui se compose de deux bobines fixes roulées avec du ruban de cuivre isolé sur des carcasses indéformables en bois durci. Ces bobines sont couplées en parallèle et aboutissent à des bornes placées à l'extérieur du boîtier métallique.

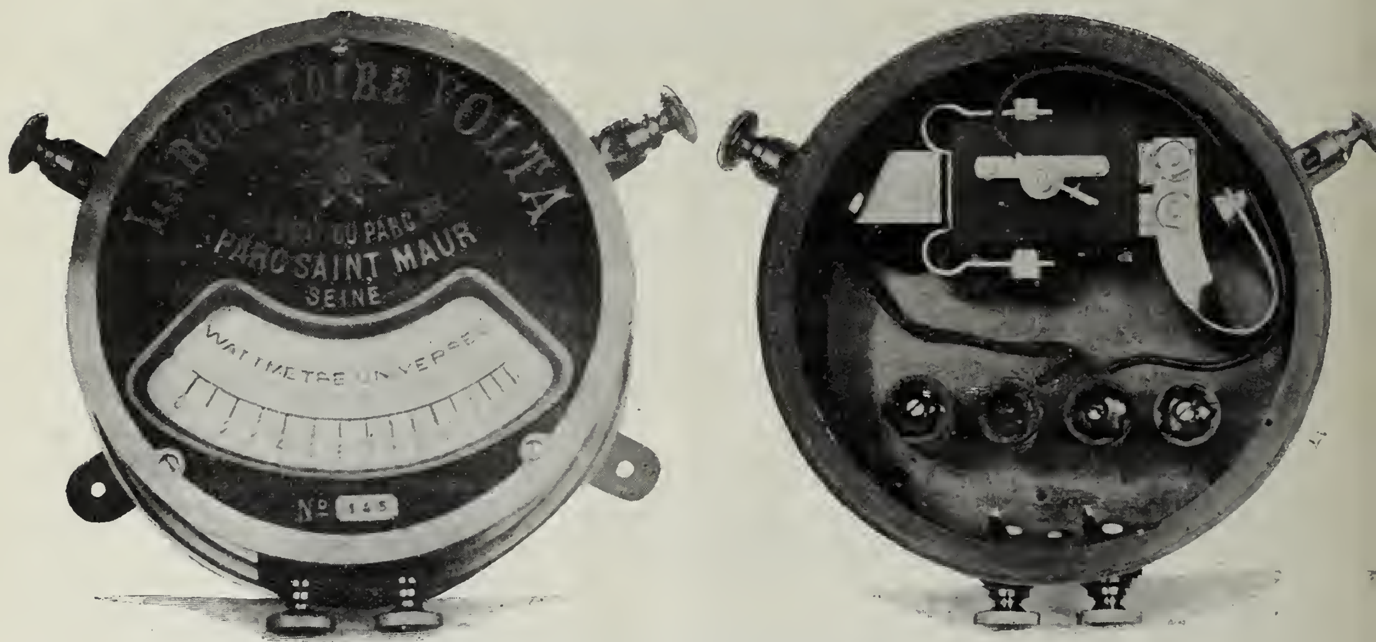



Fig. 188. — Wattmètre du laboratoire Volta.

La bobine mobile est formée de deux petites bobines en fil fin isolé, collées de part et d'autre d'un axe portant l'aiguille indicatrice et monté sur crapaudines en pierres fines.

L'équipage mobile se meut avec un très faible jeu dans une boîte entièrement fermée, de manière à assurer l'amortissement par l'air.

Les résistances qui complètent le circuit dérivé sont au nombre de quatre dans le cas de l'instrument représenté ; elles sont reliées à la bobine mobile, d'une part, et aux deux petites bornes visibles à la partie inférieure du dessin.

Le boîtier métallique est en fonte épaisse et sert à empêcher les champs magnétiques extérieurs d'exercer une action perturbatrice sur les bobines de l'instrument.

La self-induction de la bobine mobile est tellement faible qu'on peut étalonner l'instrument avec un courant continu, lorsqu'il doit servir pour des courants alternatifs.

Le laboratoire Volta exposait aussi un wattmètre de précision, construit comme le précédent, mais encore plus sensible. Sa bobine mobile pèse seulement 5 grammes et la résistance du circuit dérivé est de 5 140 ohms.

**Wattmètre enregistreur J. Richard.** — Les wattmètres Richard sont pourvus d'un système enregistreur.

L'instrument (*fig.* 189) se compose de deux bobines fixes horizontales, superposées et formées de ruban de cuivre de section appropriée pour supporter le courant principal.

Ces bobines sont couplées en série ou en quantité ; leurs extrémités aboutissent à des mâchoires permettant de les relier au circuit.

Entre ces bobines est placée une autre bobine en fil fin qui se branche en dérivation sur le circuit par l'intermédiaire d'une résistance appropriée.

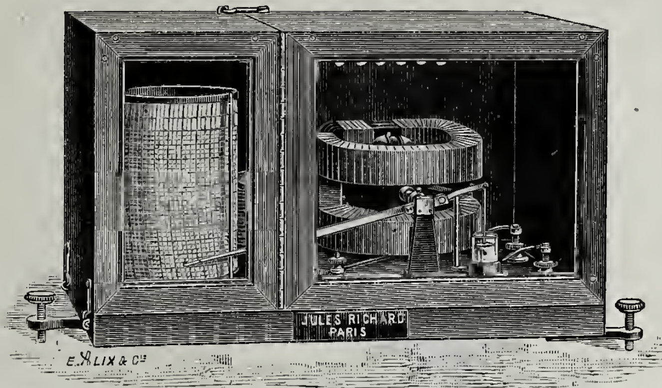



Fig. 189. — Wattmètre J. Richard.

Cette bobine, à axe horizontal, est mobile sur couteaux, l'axe portant en outre le style d'aluminium et la plume.

Sous l'influence des champs que produisent les bobines fixes et mobile, lorsque l'instrument est en service, la bobine mobile tend à s'incliner proportionnellement à la puissance.

Le couple résistant est simplement dû à l'action de la pesanteur sur un contrepoids et l'amortissement des oscillations est obtenu par une petite pompe à glycérine.

Cette pompe peut être remplacée par un amortisseur électromagnétique constitué par un disque d'aluminium de 8 cm de diamètre, calé sur l'axe de la bobine mobile et se déplaçant dans l'étroit entrefer de quatre aimants permanents. En engageant le disque plus ou moins entre les branches de ces aimants, on peut régler l'amortissement à la valeur voulue.

Dans les wattmètres destinés aux courants alternatifs, la résistance additionnelle doit être dépourvue d'induction. Ils doivent cependant être étalonnés pour une fréquence déterminée, à cause de l'importance donnée à la bobine mobile pour obtenir un couple énergique. Lorsque ces instruments sont destinés à des circuits à haute tension, le socle, ordinairement en bois d'acajou, est alors en marbre et les organes susceptibles d'être touchés (tambour, plume, etc.) sont soigneusement isolés.

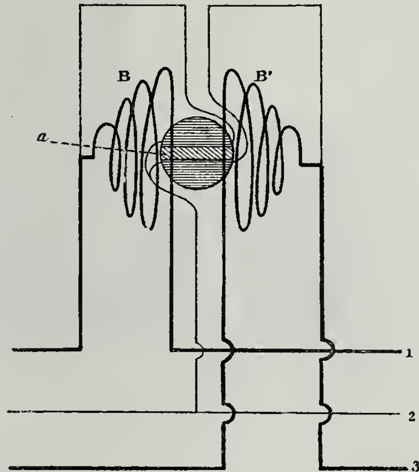



Fig. 190. — Schéma des connexions du wattmètre Richard pour courants triphasés.

M. J. Richard construit également un wattmètre enregistreur pour courants triphasés qui ne diffère pas en principe de celui qui vient d'être décrit.

Les bobines fixes B, B′ (*fig.* 190), mises en séries sur le circuit, sont au nombre de deux et en ruban de cuivre de section appropriée. Les spires ne se touchent pas et, par conséquent, c'est

l'air qui sert d'isolant. Ces bobines affectent la forme d'une hémisphère, de sorte que l'ensemble qu'elles constituent laisse, au centre, une cavité sphérique dans laquelle se place la bobine mobile *a*. Sur l'axe de cette dernière, est calé un disque en aluminium dont les bords s'engagent dans les entrefers de quatre aimants disposés radialement. L'axe de la bobine mobile porte également le levier en aluminium à l'extrémité duquel se trouve la plume inscrivante.

La bobine mobile comporte deux enroulements, placés de part et d'autre de son axe horizontal et soumis chacun à l'influence des bobines fixes.

La figure 190 donne le schéma des connexions des bobines fixes et mobile avec les conducteurs d'une distribution triphasée. La bobine fixe B est intercalée dans le conducteur 1 et la bobine B′ dans le conducteur 3; quant aux deux enroulements de la bobine mobile, ils ont un point commun relié au conducteur 2, tandis que les extrémités opposées sont reliées respectivement aux entrées des bobines fixes B, B′.

**Wattmètre universel Blondel-Labour.** — Ce wattmètre (*fig.* 191) était exposé par M. J. Ducretet, de Paris, qui en est le constructeur.

Le cadre mobile en fil fin est suspendu par un ressort en boudin S se terminant par une tête B qui porte l'aiguille, mobile devant les divisions d'un cadran. Cette disposition est analogue à celle des électrodynamomètres du genre Siemens. Sur le cadre est fixé, en outre, un index *i* permettant d'apprécier s'il se trouve bien dans la position repérée qu'il doit occuper lorsque l'équilibre des couples, moteur et résistant, est obtenu. Un miroir C permet également cette constatation, mais d'une façon plus précise encore. La figure 192 donne le schéma des connexions.

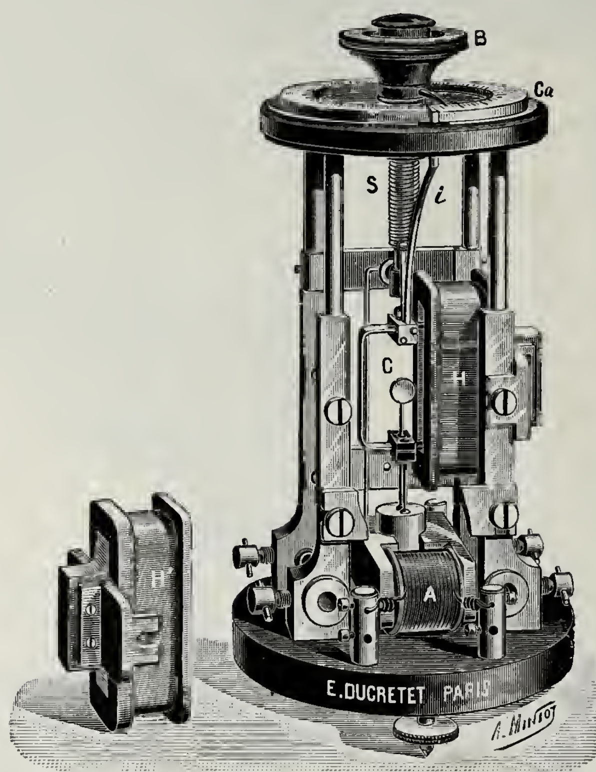


Fig. 191. — Wattmètre Blondel-Labour.

A sa partie inférieure le cadre se termine par un tambour en aluminium embrassé par les pièces polaires d'un puissant électro-aimant A.

Les bobines fixes H, H′, traversées par le courant principal, sont démontables et à un jeu de bobines on peut en substituer un autre. Ces bobines démontables sont mises en place en quelques instants et fixées contre les colonnes qui amènent le courant. Les connexions se réalisent donc d'elles-mêmes et sans qu'on puisse commettre d'erreurs de groupement. On peut d'ailleurs les coupler en série ou en parallèle. Pour les coupler en série (*fig.* 193), on les monte dans leur position normale en enlevant la barrette *bb* qui est représentée coupée sur la figure 191. Pour effectuer le couplage en parallèle (*fig.* 193), on retourne sens dessus dessous une des bobines J′, par exemple, et on met en place la barrette *bb*.

Les bobines fixes peuvent supporter jusqu'à 2 500 ampères et le cadre mobile jusqu'à 100 volts. Lorsque la tension est plus élevée, elle est ramenée en dessous de 100 volts au moyen d'un petit transformateur réducteur ou par l'emploi de résistances auxiliaires.

Les bobines A de l'amortisseur sont excitées par un courant continu provenant de deux

accumulateurs. L'intensité peut être quelconque, puisqu'elle n'intéresse que l'amortissement.

Ce wattmètre a été étudié en vue de réaliser un cadre mobile dont la self-induction soit négligeable. A cet effet le nombre de spires de ce cadre est très faible et, pour obtenir une sensibilité suffisante malgré le petit nombre de spires, le fil du cadre peut supporter un courant de 0,5 ampère.

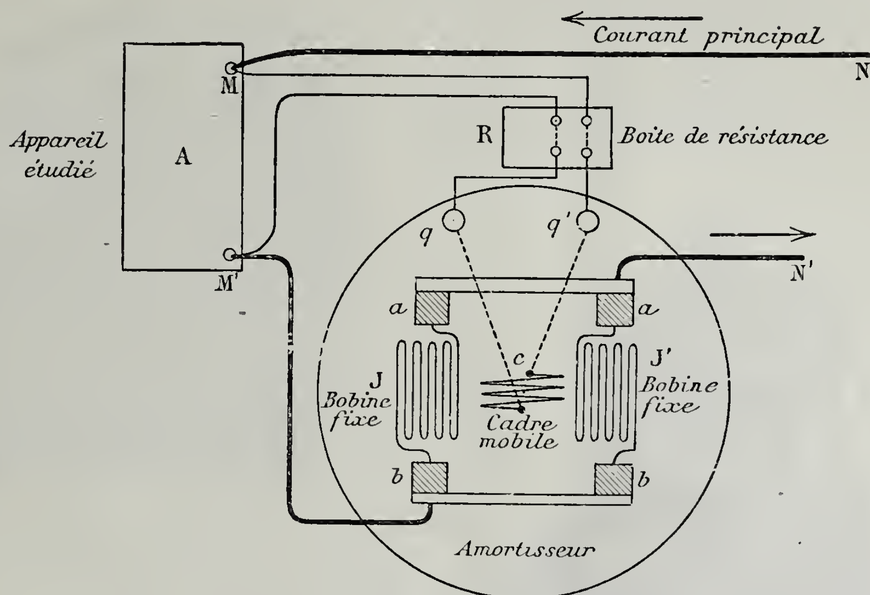



Fig. 192. — Schéma des connexions du wattmètre Blondel-Labour.

On peut faire varier la sensibilité en tendant plus ou moins les fils de suspension qui supportent la bobine mobile.

L'extrémité supérieure du fil de suspension s'enroule à cet effet sur un petit treuil logé sous un couvercle en ébonite qui surmonte le bouton B.

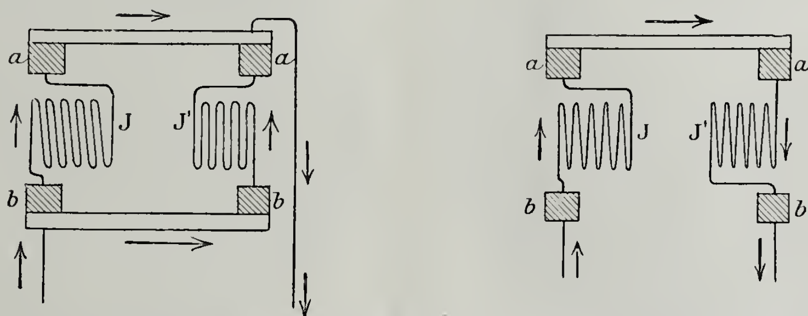



Fig. 193. — Connexions du wattmètre Blondel-Labour avec bobines couplées en parallèle et avec bobines couplées en série.

Il faut remarquer qu'en touchant à ce treuil on fait varier la constante d'étalonnage.

Pour éviter de détériorer la suspension pendant le transport, l'équipage mobile peut être immobilisé en serrant une vis qui vient bloquer le tambour amortisseur contre les pièces polaires de l'électro-aimant A.

Le courant principal est amené aux bobines par les colonnes qui les supportent et dont les parties inférieures sont munies de prises de courant avec vis de pression.

On remarquera que les prises de courant peuvent se faire sur les quatre colonnes et que les deux barrettes *b*, *b* qui réunissent les colonnes deux à deux sont amovibles.

Cette disposition permet d'intercaler les bobines H', H' de plusieurs manières dans les circuits et de réaliser les divers modes de montage à employer dans le cas de courants triphasés avec branches inégalement chargées, d'où le nom de *wattmètre universel.*

**Wattmètre Hartmann et Braun à lecture directe.** — Cet instrument est représenté par la figure 194 qui montre l'aspect du modèle de précision.

Il se compose d'une bobine fixe plate et dont le plan est incliné d'environ 40° sur l'horizontale.

Cette bobine, dont le fil de cuivre a une section appropriée, est traversée par le courant principal et ses extrémités aboutissent, à cet effet, à deux bornes fixées sur le socle de l'instrument.

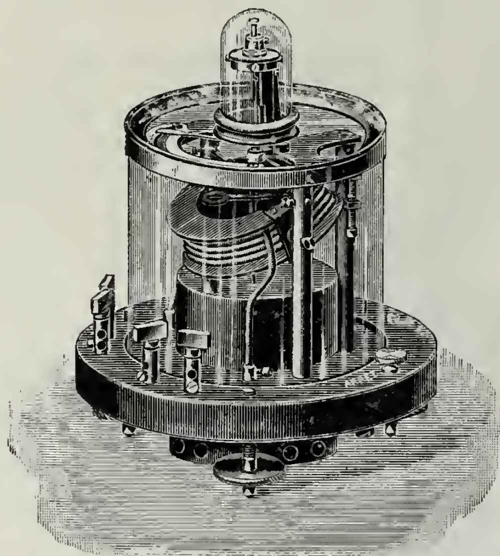


Fig. 194. — Wattmètre Hartmann et Braun.

Les bobines mobiles, roulées avec du fil fin, sont au nombre de deux. Elles ont environ de 15 à 20 mm de diamètre et tournent dans un plan horizontal, autour d'un axe vertical constitué par les fils de suspension.

Ces bobines sont fixées aux extrémités d'un bras horizontal et forment un système équilibré.

Le courant dérivé y circule, d'ailleurs, en sens contraire, afin de rendre le système astatique ; ce courant arrive aux bobines par deux rubans d'argent très minces ; il est amené à deux bornes placées sur le socle, de sorte qu'il est possible d'intercaler des résistances extérieures dans le circuit dérivé.

Une des bobines mobiles est attirée par le champ fixe, tandis que l'autre est repoussée ; l'attraction exercée sur l'une des bobines va en augmentant, tandis que la répulsion exercée sur l'autre va en diminuant. La proportionnalité de la graduation est due à cette disposition.

Afin d'éviter les erreurs de parallaxe, une glace étamée est disposée sous l'aiguille.

L'axe se prolonge en dessous du socle et porte une palette d'aluminium mobile dans une grande boîte fermée, visible partie au-dessus, partie au-dessous du socle.

Ce dispositif constitue l'amortisseur à air.

Un bouton d'arrêt placé sur le socle sert à immobiliser l'équipage mobile pendant le transport.

Le fil de suspension peut se remplacer facilement en enlevant la petite cloche en verre qui surmonte la cage de l'instrument ; on accède alors aux crochets de suspension.

La maison Hartmann et Braun exposait également un modèle de wattmètre pour tableau basé sur le même principe.

Le mécanisme est disposé dans un boîtier métallique et l'équipage mobile est monté sur pivots.

La résistance montée en série avec les bobines mobiles est placée dans le boîtier lorsque la puissance à mesurer est fournie sous une tension inférieure à 150 volts.

Quand cette tension est supérieure, on emploie des résistances additionnelles sans induction logées dans une boîte séparée.

**Wattmètres de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.** — Cet instrument, dont la figure 195 montre l'aspect extérieur, est analogue au voltmètre électrodynamique déjà décrit [1].

1. Voir page 39.

Les bobines fixes sont simplement enroulées avec du ruban de cuivre isolé et de section convenable. Leurs extrémités aboutissent à des bornes H, H, placées sur des plots en bronze (*fig.* 196) qui servent à coupler les bobines fixes en série (cheville en 3) ou en parallèle (chevilles en 2 et 4).



Fig. 195. — Wattmètre de précision de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

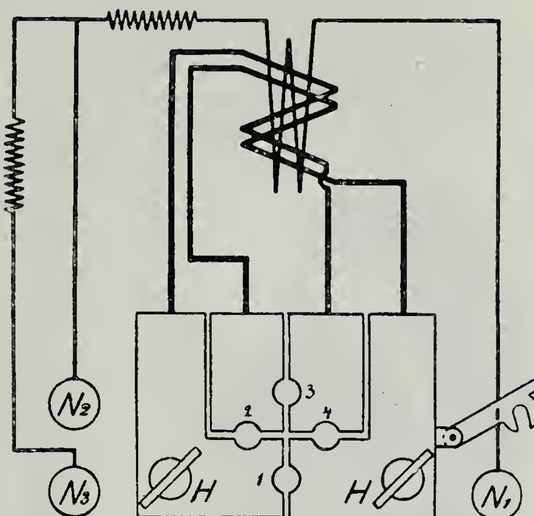



Fig. 196. — Schéma des connexions du wattmètre de précision de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le circuit extérieur aboutit aux bornes H, H et une fiche placée en 1 permet de mettre en court-circuit les enroulements en gros fil.




Fig. 197. — Wattmètre pour tableau de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

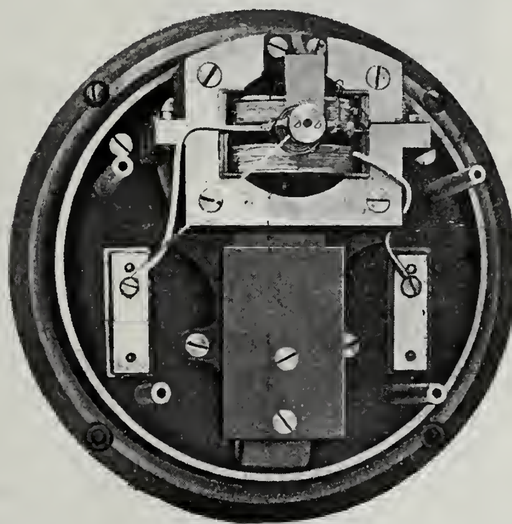


Fig. 198. — Détails de construction du wattmètre pour tableau de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

La bobine mobile est reliée, d'une part, en $N_1$, à une des bornes du circuit en gros fil au moyen d'une fourchette articulée et, d'autre part, à l'autre conducteur du réseau par l'une des bornes $N_2$ ou $N_3$, suivant qu'on veut augmenter ou diminuer la sensibilité par la suppression ou l'adjonction d'une résistance branchée sur $N_3$.

Grâce à la liaison de la bobine mobile avec la fourchette qui se serre sous la borne $N_1$, la différence de potentiel entre la bobine mobile et les bobines fixes est toujours très faible et l'on n'est pas exposé à inverser le sens de groupement de la bobine mobile et des résistances placées en série avec elle.

On sait qu'en commettant cette erreur, la différence de potentiel entre les bobines fixes et mobile pourrait être considérable, puisqu'elle serait alors celle du réseau. L'isolement pourrait être insuffisant et l'instrument détérioré.

On fait usage de la borne marquée $N_2$ sur la figure 196 pour les tensions inférieures à 125 volts et de la borne $N_3$ jusqu'à 250 volts ; pour les tensions plus élevées, on emploie une boîte de résistances additionnelles.

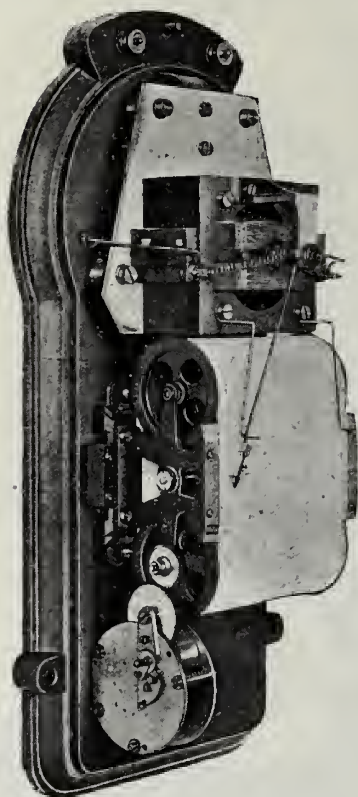


Fig. 199. — Wattmètre enregistreur de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

La bobine mobile du wattmètre a une résistance de 130 ohms et la résistance additionnelle correspondant à la borne $N_3$ a 2 000 ohms.

Elle est constituée par du fil dont le coefficient de température est négligeable.

La figure 197 montre l'aspect extérieur et la figure 198 la vue intérieure du wattmètre industriel pour tableaux de distribution. Cet instrument ne diffère pas, en principe, du modèle de précision.

Les bornes de connexion sont disposées par derrière et le boîtier est en fonte, de manière à former écran magnétique et à mettre l'instrument à l'abri des champs extérieurs.

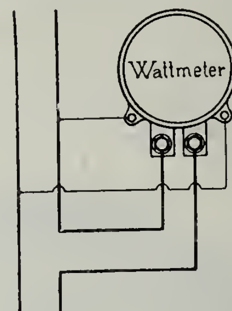



Fig. 200. — Schéma des connexions du wattmètre de l'A. E. G. sur un circuit à courant alternatif simple.

Le wattmètre enregistreur, exposé par la même Société (*fig.* 199), est de construction identique aux précédents; il n'en diffère qu'en ce que le couple moteur est rendu plus puissant en augmentant un peu l'intensité du courant dans le circuit dérivé.

Le mécanisme d'horlogerie qui fait tourner le tambour porte-papier présente cette particularité qu'on peut modifier presque instantanément la vitesse de déroulement. Il suffit, pour cela, de changer les roues dentées fixées l'une au-dessus du barillet du mouvement et l'autre sur l'axe du tambour inférieur.

Afin d'obtenir une longueur de papier assez grande, sans employer un tambour de grand diamètre, le papier forme un rouleau sans fin tendu par deux tambours de petit diamètre.

Le tambour supérieur ne sert que de tendeur ; il n'a pas de relation avec le mouvement d'horlogerie.

Des butoirs, formés de ressorts métalliques, empêchent la plume d'être projetée en dehors du papier.

Les wattmètres pour courants triphasés sont les mêmes que ceux qui viennent d'être décrits. Seul, le mode de connexion avec le circuit extérieur est différent.

Les figures schématiques 200, 201 et 202 indiquent les communications à établir :

1° Pour un circuit à courant alternatif simple ;

2° Pour un circuit à courants triphasés avec montage en étoile et point neutre accessible;

3° Pour un circuit à courants triphasés avec montage en triangle ou montage en étoile avec

point neutre inaccessible ou n'existant pas. Dans ce dernier cas, il faut créer un point neutre artificiel à l'aide d'une boîte de résistances spéciale comportant quatre bornes. Trois de ces bornes sont reliées respectivement aux trois conducteurs de la canalisation et mettent ces derniers

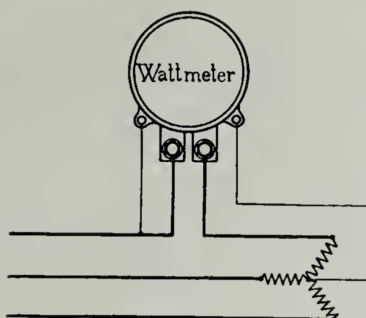



Fig. 201. — Schéma des connexions du wattmètre de l'A. E. G. sur un circuit à courants triphasés monté en étoile.

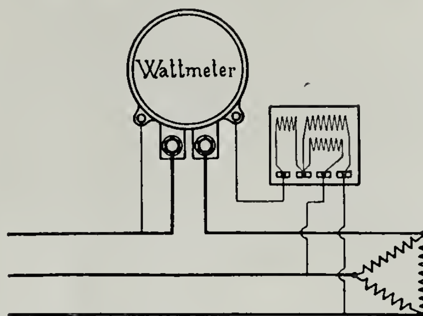



Fig. 202. — Schéma des connexions d'un wattmètre de l'A. E. G. sur un circuit à courants triphasés monté en triangle.

en communication avec des résistances non inductives rigoureusement égales; l'extrémité opposée de chacune de ces trois résistances aboutit à la quatrième borne constituant le point neutre artificiel.

**Wattmètre Siemens et Halske.** — Le wattmètre Siemens et Halske, que représente la figure 203, est un modèle de précision dont la disposition rappelle beaucoup celle du wattmètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft. Cependant, l'amortissement des oscillations de la bobine mobile n'est plus obtenu par un frein électromagnétique. La Société Siemens a préféré employer un amortisseur à air formé d'un tube cylindrique en laiton, cintré en quart de cercle concentrique à l'axe de la bobine mobile. Cet axe porte une tige horizontale recourbée qui se termine par un piston mobile sans frottement dans le tube cintré. Cette

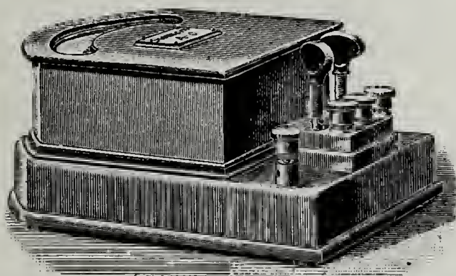


Fig. 203. — Wattmètre de précision Siemens et Halske.




Fig. 204. — Wattmètre industriel Siemens et Halske.

disposition est la même que celle qui a été adoptée pour l'ampèremètre déjà décrit[1].

Cet instrument peut également servir d'électrodynamomètre ordinaire en branchant la bobine mobile en dérivation sur les bornes des bobines fixes. Pour que les indications soient indépendantes de la fréquence des courants, il faut que le rapport des impédances des bobines fixes et mobile soit constant, c'est-à-dire invariable avec la fréquence.

Comme wattmètre industriel pour tableaux de distribution, la Société Siemens exposait un

1. Voir pages 47 et 48.

autre modèle (*fig.* 204), qui ne diffère pas en principe de celui de précision. Les résistances additionnelles sont montées dans une boîte fermée par de la tôle perforée.

Le fil est enroulé sur des plaques de mica aussi minces que le permet leur solidité. La surface embrassée par chaque spire est ainsi excessivement petite et la self-induction se trouve être, par suite, négligeable.

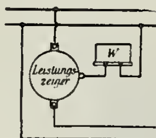



Fig. 205. — Schéma des connexions du wattmètre Siemens et Halske sur un circuit à courant alternatif simple.

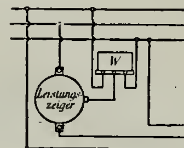



Fig. 206. — Schéma des connexions du wattmètre Siemens et Halske sur un circuit à courants triphasés.

Le fil est même presque toujours remplacé par un mince ruban roulé à plat sur les feuilles de mica ; ce ruban permet un refroidissement plus facile.

Ces feuilles sont disposées dans une boîte et laissent entre elles un espace de 7 mm à 8 mm qui favorise le refroidissement en même temps qu'il assure un excellent isolement.

La figure 205 montre les connexions à établir pour mettre le wattmètre en service sur une canalisation à courant alternatif simple.

Les wattmètres pour courants triphasés sont identiques au précédent ; il n'y a qu'à établir les connexions extérieures comme le montre la figure 206.

**Wattmètre lord Kelvin.** — Cet instrument (*fig.* 207), construit et exposé par M. James White, de Glasgow, est destiné à être monté sur les tableaux de distribution et peut servir pour les circuits à haute tension comme pour ceux à basse tension, en modifiant convenablement la résistance du circuit dérivé.

C'est un électrodynamomètre (*fig.* 208) qui présente deux particularités remarquables : le mode de suspension de l'équipage mobile et la combinaison de cet équipage qui le rend à peu près indépendant des actions perturbatrices extérieures.

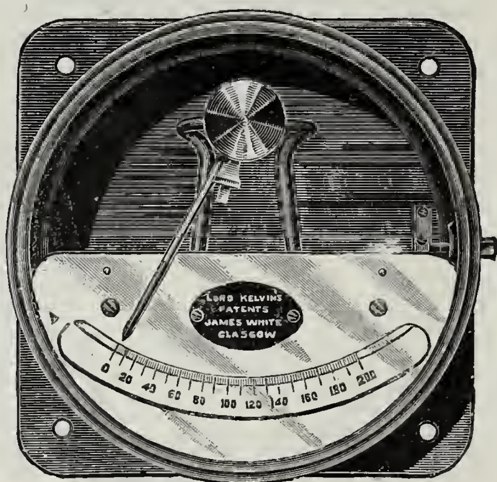



Fig. 207. — Wattmètre lord Kelvin.

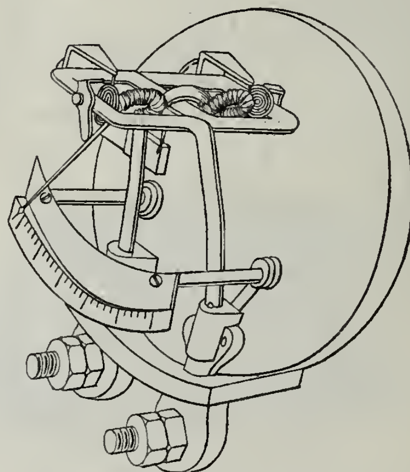


Fig. 208. — Détails de construction du wattmètre lord Kelvin.

La suspension est un dispositif très rudimentaire qui se rapproche de la suspension sur couteaux, avec l'avantage d'admettre des déviations plus grandes tout en facilitant le transport de l'instrument.

L'une des extrémités de l'axe de rotation de l'équipage mobile se termine par un œillet dont le bord est biseauté ; l'autre bout est droit. L'œillet et le pivot sont simplement suspendus à deux crochets (*fig.* 209).

L'indifférence aux actions extérieures est obtenue en rendant l'équipage astatique par rapport aux champs autres que celui que produisent les bobines fixes. L'équipage mobile comporte donc deux bobines, reliées entre elles par un bras léger en aluminium et enroulées en sens inverse.

Il faut un double système fixe qui agisse en sens inverse sur ces deux bobines, de manière que les couples s'ajoutent. Dans les instruments de grande puissance, ce système est constitué par un conducteur unique en cuivre, affectant la forme d'un 8 ou d'un S, et formant ainsi deux bobines à spire unique agissant dans le sens voulu sur celles de l'équipage mobile.

Le couple directeur est produit par deux petits ressorts en palladium qui servent, en même temps, de conducteurs au courant.

Chaque bobine mobile comporte 1 000 tours et la résistance totale des deux bobines est de 200 ohms. L'intensité maximum du courant qui les parcourt n'est que de 0,05 ampère.

La résistance supplémentaire, non inductive, est de 2 000 ohms pour 100 volts; elle est enroulée en dessous de la boîte contenant l'instrument, de manière à offrir une grande surface de refroidissement.

L'instrument est monté sur un socle en ardoise sur lequel sont fixées les bobines fixes et les supports de l'échelle divisée.

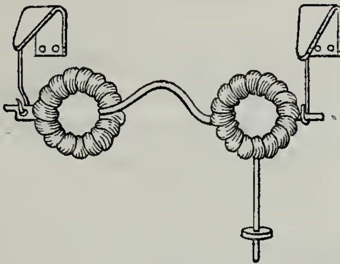


Fig. 209. — Détails de construction du wattmètre lord Kelvin.

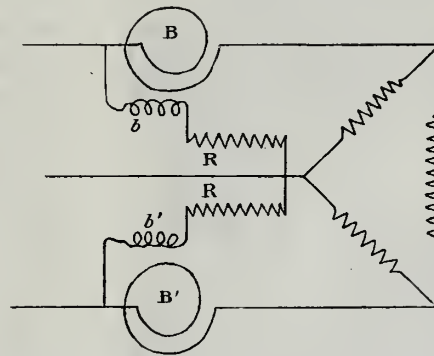



Fig. 210. — Schéma des connexions du wattmètre lord Kelvin sur un circuit à courants triphasés.

Un autre modèle de wattmètre est établi pour les circuits à courants triphasés. On établit alors les connexions comme l'indique la figure 210 pour le cas d'un circuit triphasé monté en triangle. Les bobines fixes B B′ sont intercalées respectivement en série dans les conducteurs 1 et 3 de la canalisation. Les bobines mobiles *b b′* sont reliées en dérivation, d'une part aux bobines fixes et, d'autre part, au conducteur 2, après avoir traversé chacune une résistance RR non inductive. Ces deux résistances doivent être rigoureusement égales.

La graduation de ce wattmètre est établie de manière à faire connaître, par une simple lecture, la puissance totale du système triphasé. Les indications sont exactes même si les trois phases sont inégalement chargées.

Au point de vue de l'isolement, chaque instrument est essayé par le constructeur sous une tension double de la tension maximum de fonctionnement. Les wattmètres pour tensions au-dessous de 250 volts ont leurs résistances additionnelles placées à l'intérieur du boîtier; au-dessus de 250 volts, on les loge dans une boîte indépendante.

Il se construit quatre modèles de ce wattmètre pour une intensité de 200 ampères et des tensions respectives de 200, 500, 1 000 et 2 500 volts.

Les bornes sont placées sur la partie postérieure et un bouton sert à immobiliser l'équipage mobile lorsqu'on transporte l'instrument.

**Wattmètres Ganz.** — Dans les wattmètres de la maison Ganz et Cie, de Budapest, le cadre mobile est enroulé avec du fil d'aluminium afin de réduire la masse en mouvement. Celle-ci est de 23 grammes et ses pivots tournent dans des crapaudines en saphir. Deux bandes très minces, en argent, servent à amener le courant au cadre.

Les indications de torsion du ressort doivent être multipliées par la résistance du circuit

et par la constante de l'instrument. Les indications sont indépendantes de la fréquence des courants, grâce à la faible self-induction des bobines.

Les résistances additionnelles qu'on intercale dans le circuit du cadre mobile, suivant la tension du courant à mesurer, sont renfermées dans une boîte et sont divisées en fractions de 250 ohms, sauf la première, qui n'a que 237 ohms et qui constitue 250 ohms avec le cadre mobile qui a une résistance de 13 ohms.

Ces résistances sont en fil de manganin et leur résistance est ajustée au millième; elles n'ont pas de self-induction.

Le cadre et les résistances additionnelles peuvent supporter indéfiniment un courant de 0,1 ampère et, pendant quelques instants, 0,13 ampère. Tous les wattmètres de cette maison ayant un cadre mobile de 13 ohms ; les résistances additionnelles sont interchangeables.

Ces wattmètres ne sont pas à lecture directe; la Société Ganz en exposait quatre modèles ne différant que par la puissance qu'ils peuvent mesurer. L'un était construit de manière à pouvoir mesurer une puissance très faible et est destiné à déterminer les pertes à vide des transformateurs.

Un wattmètre de construction ancienne (1887) figurait à côté des modèles récents, afin de mieux faire saisir les progrès réalisés depuis cette époque dans la construction de ce genre d'instruments.

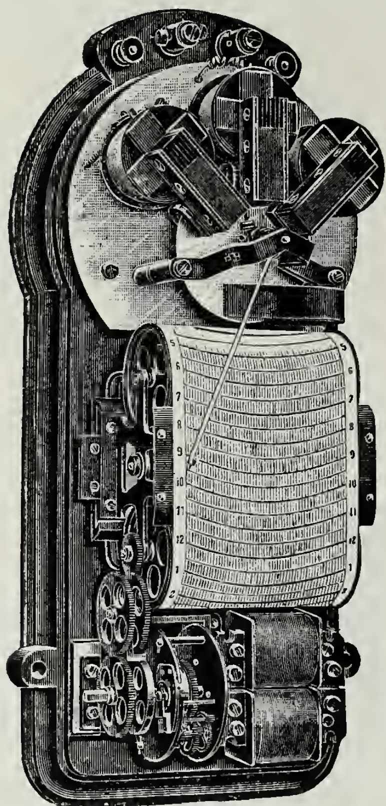


Fig. 211. — Wattmètre d'induction avec enregistreur de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

### WATTMÈTRES D'INDUCTION

**Wattmètres de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.** — Les wattmètres exposés par cette Société sont basés sur le même principe que les ampèremètres et les voltmètres d'induction décrits précédemment[1].

Les électro-aimants, munis d'écrans, sont au nombre de trois et agissent sur le même disque mobile (*fig.* 211).

L'électro-aimant placé au milieu ne comporte pas d'écran et est excité par le courant principal; les deux autres, garnis d'écrans en cuivre rouge, ont leur bobine mise en dérivation sur le circuit.

L'amortissement est obtenu par un aimant dont les branches embrassent le bord du disque mobile.

La graduation dépend de la fréquence.

Ce modèle de wattmètre se construit avec enregistreur (*fig.* 211) ou sans enregistreur.

Lorsque ces instruments sont placés sur un circuit à haute tension, on ne les monte pas directement sur ce circuit; comme les indications qu'ils fournissent sont indépendantes de la forme des courbes de courant, on alimente les bobines des électro-aimants par l'intermédiaire de transformateurs réducteurs de tension.

**Wattmètre Ferraris.** — Cet instrument (*fig.* 212), construit et exposé par la Société Siemens et Halske, de Berlin, est basé sur le même principe que les ampèremètres et voltmètres du même inventeur[2].

1. Voir page 61.
2. Voir page 64.

Les bobines montées en série sur le circuit principal sont disposées sur les deux pôles diamétraux *f*, *f* (*fig.* 213), tandis que les bobines montées en dérivation sont celles marquées *e*, *e* sur la figure. L'équipage mobile, constitué par un tambour *b* en aluminium, se comporte comme une cage d'écureuil de moteur à champ tournant.

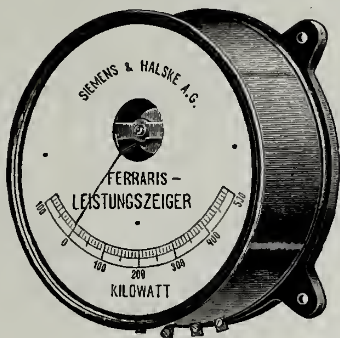



Fig. 212. — Wattmètre d'induction Ferraris.

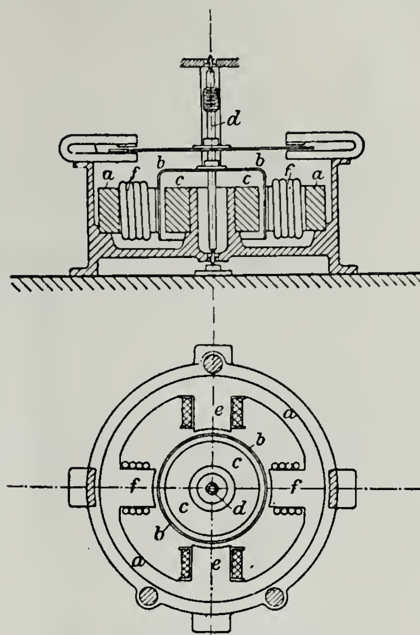


Fig. 213. — Détails de construction du wattmètre d'induction Ferraris.

Lorsque les courants qui doivent passer dans les bobines *f*, *f* ont une intensité supérieure à 300 ampères, on utilise un transformateur. De même, si la tension que doivent supporter les bobines *e*, *e* est supérieure à 550 volts, on place en série avec elles une bobine de réactance ; ce n'est qu'avec les courants de haute tension que l'on fait usage d'un transformateur, ce qui présente l'avantage de mettre l'instrument en dehors du circuit dangereux.

VIII

## INSTRUMENTS DE MESURE SPÉCIAUX POUR LES COURANTS ALTERNATIFS

Indépendamment des instruments de mesure, tels que voltmètres, ampèremètres, etc., utilisés sur les circuits à courants alternatifs, il y a certains instruments spéciaux dont l'usage tend à se répandre de plus en plus. Ce sont les phasemètres, les fréquencemètres, les oscillographes et les rhéographes.

### PHASEMÈTRES

Les phasemètres ont pour objet de faire connaître, par une simple lecture, la valeur du facteur de puissance d'un réseau alimenté par des courants alternatifs. Les phasemètres pourraient remplacer les trois instruments : ampèremètre, voltmètre et wattmètre, qui permettent, par trois lectures simultanées, une sur chacun de ces instruments, de déterminer le facteur de puissance par la méthode habituelle.

En pratique, les phasemètres ne sont utilisables qu'à la condition que les courbes de tension et d'intensité soient des sinusoïdes, condition difficile à réaliser, car les harmoniques de fréquences supérieures à la fondamentale viennent compliquer la forme des courbes de tension, et principalement celles d'intensité.

Les phasemètres ne sont guère employés qu'en Allemagne et ceux qui figuraient à l'Exposition étaient presque exclusivement de construction allemande.

**Phasemètre Siemens et Halske.** — Cet instrument qui affecte extérieurement l'aspect d'un wattmètre de tableau de distribution ne laisse voir qu'un boîtier muni de quatre bornes et une graduation devant laquelle se meut une aiguille indicatrice.

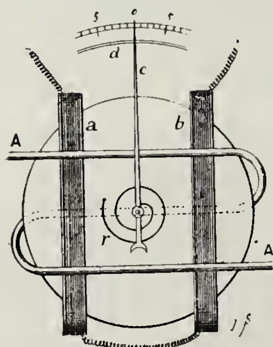


Fig. 214. — Phasemètre Dolivo Dobrowolski.

La figure 214 montre comment est constitué l'instrument qui a été combiné par von Dolivo Dobrowolski.

Un disque mince de tôle de fer est monté sur un axe qui porte l'aiguille $c$ ; cet axe tourne dans des crapaudines en saphir.

Un ressort spiral $r$, en bronze, tend à maintenir ce disque au zéro de la graduation.

Sur ce disque agissent deux enroulements : l'un A, en ruban de cuivre de section appropriée, est parcouru par le courant principal; l'autre, formé de deux bobines $a$, $b$, enroulées en fil fin, est disposé perpendiculairement au plan de la bobine A. Ces bobines $a$, $b$, reliées en série, sont montées en dérivation sur le circuit, par l'intermédiaire d'une résistance additionnelle non inductive. L'instrument comprend donc les enroulements d'un wattmètre.

Le courant dans le circuit dérivé est toujours en phase avec la tension du réseau, cet enroulement ayant une self-induction négligeable.

Au contraire, dans la bobine A, le courant a le même décalage que celui qui existe dans le réseau.

Il se produit donc un champ tournant qui agit sur le disque mobile et exerce sur lui un couple :

$$C = KI \sin \varphi.$$

K est la constante de l'instrument et I sinus φ est la composante déwattée du courant principal.

L'instrument étant gradué empiriquement se comporte comme un ampèremètre qui n'indiquerait que le courant déwatté.

D'ailleurs, le zéro étant au milieu de la graduation, il est facile de voir le signe de I sinus φ d'après le sens de la déviation.

Si la déviation se produit vers la droite, le courant est en retard sur la tension et le courant déwatté provient de la self-induction des appareils branchés sur le réseau, appareils qui absorbent des courants magnétisants.

Si la déviation est à gauche, le courant avance sur la tension et il est dû à des phénomènes de capacité ou à la présence de moteurs synchrones convenablement surexcités.

**Phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.** — Cet instrument, que représente la figure 215, est constitué comme le wattmètre d'induction qui a été décrit précédemment[1].




Fig. 215. — Phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

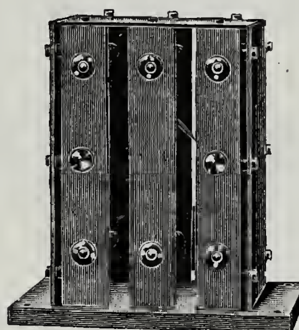


Fig. 216. — Résistance pour phasemètre de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft.

Le disque mobile, monté sur pointes et portant l'aiguille, est influencé par trois systèmes d'électro-aimants.

Celui du milieu est excité par le courant principal et ne comporte pas d'écrans à ses pôles.

Les deux autres électro-aimants, placés de part et d'autre du premier, ont leurs pôles munis d'écrans formant un circuit en dérivation sur le réseau.

Contrairement à ce qui se passe pour le wattmètre, où le courant dérivé doit être décalé d'un quart de période par rapport à sa tension, le courant, dans le cas actuel, doit être en phase avec cette tension. A cet effet, la bobine de self-induction qui, dans le wattmètre, remplace la résistance non inductive ordinaire, est ici supprimée. On lui substitue une résistance sans induction dont la figure 216 montre l'aspect.

Cette résistance, pour 3 000 volts, est fractionnée et enroulée dans la gorge de poulies en porcelaine. Celles-ci sont maintenues entre des plaques de stabilite et forment trois rangées verticales.

L'isolement et le refroidissement sont ainsi assurés. L'instrument est gradué empiriquement en ampères (I sinus φ) et fait connaître le courant déwatté avec son signe, le zéro étant au milieu.

1. Voir page 124.

Cet instrument a l'avantage de donner des indications indépendantes de la forme des courbes de courant, mais sa graduation n'est valable que pour une fréquence peu différente de celle du courant qui a servi à l'étalonner.

Les oscillations sont amorties par un aimant entre les pôles duquel s'engage le disque mobile.

La même Société exposait un instrument du même genre pour courants triphasés.

Dans ce phasemètre, il y a un électro-aimant monté en série dans le circuit et deux électro-aimants mis en dérivation : le premier se branche sur le conducteur 1 de la distribution, tandis que les électro-aimants en dérivation se branchent entre les fils 1, 2 et 3, par l'intermédiaire d'une triple résistance destinée à créer un point neutre artificiel.

Ce montage est, d'ailleurs, identique à celui que représente la figure 202 donnant les connexions à établir pour un wattmètre placé dans un circuit à courants triphasés.

**Phasemètre Hartmann et Braun.** — Cet instrument, étudié par M. Bruger, se compose de deux bobines fixes $N_1$, $N_2$, montées en série et intercalées sur un des conducteurs du réseau, comme la bobine à gros fil d'un wattmètre (*fig.* 217).

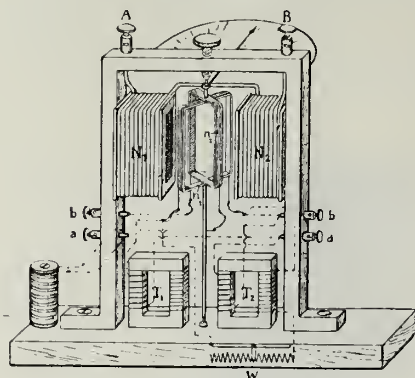


Fig. 217. — Phasemètre Hartmann et Braun.

Dans les champs de ces bobines peut se mouvoir une double bobine à fil fin, formée de deux cadres indépendants $n_1$, $n_2$, disposés perpendiculairement.

Un de ces cadres est monté en dérivation sur les deux conducteurs de la canalisation à travers une bobine de résistance non inductive, visible sur la gauche du dessin.

L'autre cadre est également dérivé sur le réseau, mais à travers une bobine de self-induction composée de deux petits transformateurs $T_1$, $T_2$.

Le transformateur $T_2$ a son secondaire fermé sur une résistance variable W non inductive.

Grâce à ces dispositions, les courants dans les deux cadres mobiles sont décalés d'un quart de période.

Si le courant qui traverse les bobines fixes ne présente pas de décalage, le système de bobines mobiles doit se maintenir au zéro, tandis qu'il reste en équilibre indifférent s'il n'y a pas de courant qui y passe.

Si le courant dans les bobines fixes est plus ou moins déwatté, le système de bobines mobiles prendra une orientation définie et l'aiguille indique directement la valeur de l'angle $\varphi$ du décalage.

On règle l'instrument en s'assurant qu'il n'y a pas de déviation lorsqu'un courant n'ayant pas de décalage traverse les bobines fixes $N_1$, $N_2$ (courant fourni par un alternateur qui débite sur des lampes à incandescence). S'il se produit une déviation, on agit sur la résistance W jusqu'à ce que la déviation soit nulle; l'appareil est alors réglé.

Les indications de cet instrument dépendent de la fréquence, à cause de la présence du fer dans les transformateurs $T_1$, $T_2$.

On remarquera que l'équipage mobile et la disposition de cet instrument sont semblables à eux de l'ohmmètre à lecture directe de la même maison.

Le courant arrive aux cadres par des fils extrêmement souples qui ne doivent pas introduire de couple de torsion.

**Phasemètre des tangentes de Riccardo Arno.** — Dans cet instrument, représenté schématiquement par la figure 218, on obtient la valeur de la tangente de l'angle de décalage au moyen de deux lectures successives effectuées sur les deux cadrans distincts que porte l'instrument.

Ce phasemètre se compose d'une bobine fixe $A_1$ et d'une bobine mobile $A_2$ suspendue par des ressorts en boudin $m$, $m$.

Les courants $I$, $I'$, dont on veut mesurer la différence de phase, traversent chacun une des deux bobines $A_1$, $A_2$. A cet effet, on se sert respectivement des bornes 1, 2 et 3, 4.

Cette partie de l'instrument ne diffère pas, comme construction, d'un électrodynamomètre ordinaire.

L'index I de la bobine mobile peut toujours être ramené devant un repère en tordant le ressort $m$. On apprécie cette torsion sur le cadran D, à l'aide de l'aiguille I'.

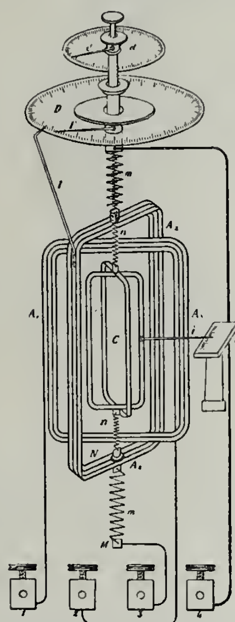


Fig. 218. — Phasemètre des tangentes Riccardo Arno.

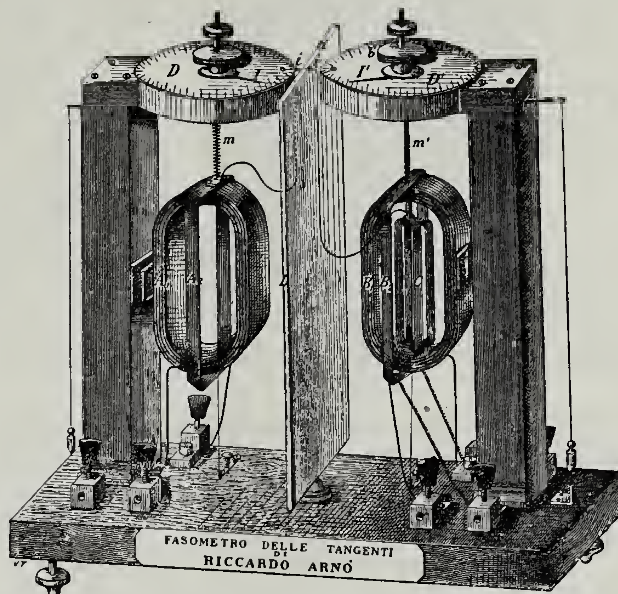



Fig. 219. — Autre modèle de phasemètre des tangentes Riccardo Arno.

Entre les bobines $A_1$, $A_2$ se trouve un double cadre C, formé de deux rectangles en cuivre fixés perpendiculairement l'un à l'autre. Ces deux cadres, qu'on peut remplacer par un tambour d'aluminium, constituent un induit de moteur à champ tournant fermé sur lui-même. Ces cadres sont suspendus par des ressorts $n$, $n$ et l'index $i$, que porte l'un des cadres, peut être amené devant un repère en tordant les ressorts $n$, $n$. On apprécie cette torsion par la position de l'index $i'$ sur le disque divisé $d$.

Pour faire une mesure, on tourne l'index I' jusqu'à ce que les deux bobines $A_1$, $A_2$ restent perpendiculaires; soit $\alpha$ la torsion donnée aux ressorts $m$ pour équilibrer le couple dû au courant.

On déplace alors l'index $i'$ jusqu'à ce que l'index $i$ vienne au zéro ; soit $\alpha'$ la déviation sur le cadran $d$.

On a :

$$\text{tang } \varphi = K \frac{\alpha'}{\alpha},$$

K étant la constante de l'instrument.

En réalité, pendant la détermination de $\alpha$, les cadres C ne doivent pas être fermés sur eux-mêmes.

Un dispositif, non figuré sur le dessin, permet d'ouvrir ou de fermer à volonté le circuit des deux cadres.

Ceux-ci ne sont fermés sur eux-mêmes que pendant la mesure de $\alpha'$.

Cet appareil présente l'inconvénient de nécessiter que les courants $I$, $I'$ restent constants pendant toute la durée de l'essai.

Le professeur R. Arno exposait un autre instrument n'offrant pas cet inconvénient et permettant d'opérer en une seule fois. Cet instrument (*fig.* 219) se compose d'un électrodynamomètre ordinaire dont les bobines $A_1$ fixe et $A_2$ mobile sont parcourues par les courants $I$, $I'$, dont on veut connaître la différence de phase. Ces courants parcourent en outre respectivement les bobines fixes $B_1$, $B_2$, visibles à droite ; entre ces bobines se trouve le cadre C formé de deux bobines perpendiculaires fermées sur elles-mêmes.

Un écran L en cuivre rouge pur (exempt de fer) sépare les deux systèmes de bobines de gauche et de droite et évite qu'ils ne s'influencent réciproquement.

Pendant le passage des courants $I$, $I'$, on tourne simultanément les deux boutons de torsion et on amène en même temps les index des deux systèmes devant leur repère. Comme précédemment, les index I, I' mobiles devant les divisions des cadrans D, D' font connaître les angles $\alpha$, $\alpha'$ qui permettent de calculer la tangente de l'angle $\varphi$.

## FRÉQUENCEMÈTRES

Les fréquencemètres sont, comme leur nom l'indique, des instruments qui servent à déterminer la fréquence d'un courant alternatif.

Comme ces instruments sont peu nombreux et que leur usage est, d'ailleurs, assez restreint, nous ne ferons que les décrire sommairement.

**Fréquencemètre à diapason Stockardt.** — Cet instrument, construit par la maison Stieberitz, de Dresde (Allemagne), se compose d'un diapason dont les branches sont larges et minces. Des masses peuvent être déplacées le long des branches en tournant un bouton moletté qui, par l'intermédiaire d'un fil, tire en même temps sur les deux masses.

Ce dernier point est important, les deux branches devant rester d'accord. La période de vibration diminue quand les masses se rapprochent des extrémités libres des branches. Ce diapason est entretenu électriquement par l'intermédiaire d'un électro-aimant traversé par le courant dont on veut déterminer la fréquence. Il entre en vibration quand sa période correspond à celle du courant.

Celle-ci se lit sur une graduation tracée empiriquement et qui s'étend de 40 à 50 périodes par seconde.

L'instrument est disposé comme un voltmètre et, comme lui, se place en dérivation sur le circuit. Il supporte 100 volts sans résistances additionnelles.

**Fréquencemètre R. Kempf.** — Le fréquencemètre de R. Kempf, construit et exposé par MM. Hartmann et Braun, est basé sur les phénomènes de résonance.

Cet instrument (*fig.* 220) comporte une série de 32 lames vibrantes en acier, montées comme des anches de musique et disposées contre la paroi intérieure d'une boîte cylindrique. Ces anches sont réglées par demi-période de 40 à 50 périodes par seconde. Un électro-aimant droit, porté par un axe pivotant au centre de la boîte, peut être amené successivement en regard de chacune de ces anches. Cet électro-aimant en fil fin se place, comme un voltmètre, en dérivation sur le circuit ; lorsqu'il est parcouru par un courant alternatif et qu'il passe devant une anche accordée pour la même période que ce courant, cette anche vibre et rend un son d'autant plus intense que la résonance est plus parfaite.

Pour se servir de cet instrument, il suffit simplement de faire tourner l'électro-aimant jusqu'à ce qu'il soit amené devant l'anche convenable ; à ce moment, un index, porté par l'axe, indique sur un cadran la fréquence correspondante. Si la fréquence est comprise entre les valeurs de deux anches consécutives, elles vibrent toutes deux en même temps, indiquant ainsi une valeur intermédiaire entre les deux indications.

**Fréquencemètre Hartmann et Braun.** — Un autre modèle de fréquencemètre, exposé par les mêmes constructeurs (*fig.* 221), est plutôt un indicateur qu'un instrument de mesure. Il ne comporte que deux lames vibrantes : l'une vibrant lorsque la fréquence est supérieure à la normale, l'autre lorsque cette fréquence est inférieure. Deux électro-aimants actionnent ces lames.

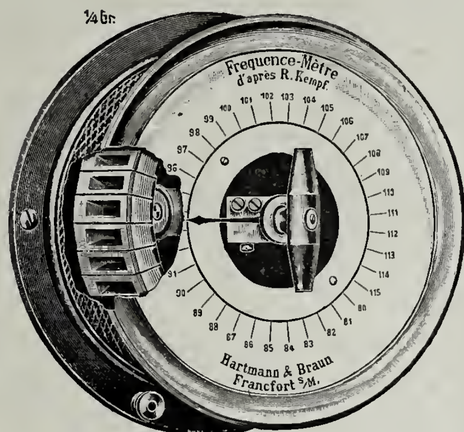
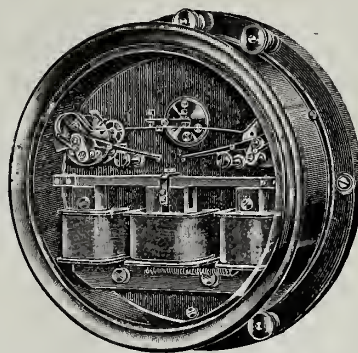


Fig. 220. — Fréquencemètre R. Kempf.


Fig. 221. — Fréquencemètre Hartmann et Braun.

Lorsque la vitesse angulaire de la dynamo génératrice est normale, les lames ne vibrent point ; mais, si la vitesse angulaire augmente ou diminue, l'une des deux lames entre en vibration et l'amplitude du son est d'autant plus grande que l'on se rapproche le plus de la résonance.

**Fréquencemètre R. Arno.** — Le dispositif imaginé par le professeur Riccardo Arno ne constitue pas un instrument spécial ; il se compose d'un électromètre, d'un condensateur C de 1 microfarad et d'une boîte de résistances. Ces instruments sont reliés entre eux, comme l'indique le schéma donné par la figure 222.

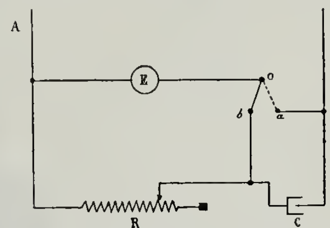


Fig. 222. — Fréquencemètre R. Arno.

Le condensateur est monté en série avec la résistance variable R qui doit être non inductive et les deux instruments sont placés en dérivation sur les deux conducteurs A, B du réseau.

L'électromètre est d'abord branché sur le réseau en mettant la manette du commutateur O sur le plot *a* et on mesure la différence de potentiel *U* entre A et B. On place ensuite la manette en *b* pour mesurer la différence de potentiel aux bornes de la résistance R que l'on fait varier jusqu'à ce que la tension mesurée *U'* soit égale à $\frac{U}{2}$.

On a ainsi tous les éléments nécessaires pour calculer la fréquence et il n'y a qu'à appliquer la relation suivante pour calculer $\omega$ :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} = \frac{U'}{R} = \frac{U}{2R},$$

le courant ayant la même intensité dans la résistance R et dans le condensateur.

Dans l'expression ci-dessus, $\omega = 2\pi$ fois la fréquence.

## OSCILLOGRAPHES ET RHÉOGRAPHES

Les instruments servant à l'étude des courbes des courants alternatifs se divisent en deux classes :

1° Instruments traçant les courbes d'une manière ininterrompue, comprenant les oscillographes et les rhéographes, dans lesquels les courbes sont observées à l'aide de la méthode stroboscopique ;

2° Instruments permettant le tracé des courbes par points et basés sur la méthode du contact instantané imaginée par M. Joubert.

En principe, les oscillographes se composent d'un galvanomètre dont la période d'oscillation propre est excessivement courte et d'un analyseur comprenant un moteur synchrone. Dans les rhéographes, au contraire, les oscillations du galvanomètre sont très lentes, comparées à la période du courant étudié.

**Oscillographe Duddell.** — Cet instrument (*fig.* 223), construit et exposé par la Cambridge Scientific Instrument C°, de Cambridge (Grande-Bretagne), se compose de deux parties essentielles : le galvanomètre ou oscillographe proprement dit et le moteur synchrone.

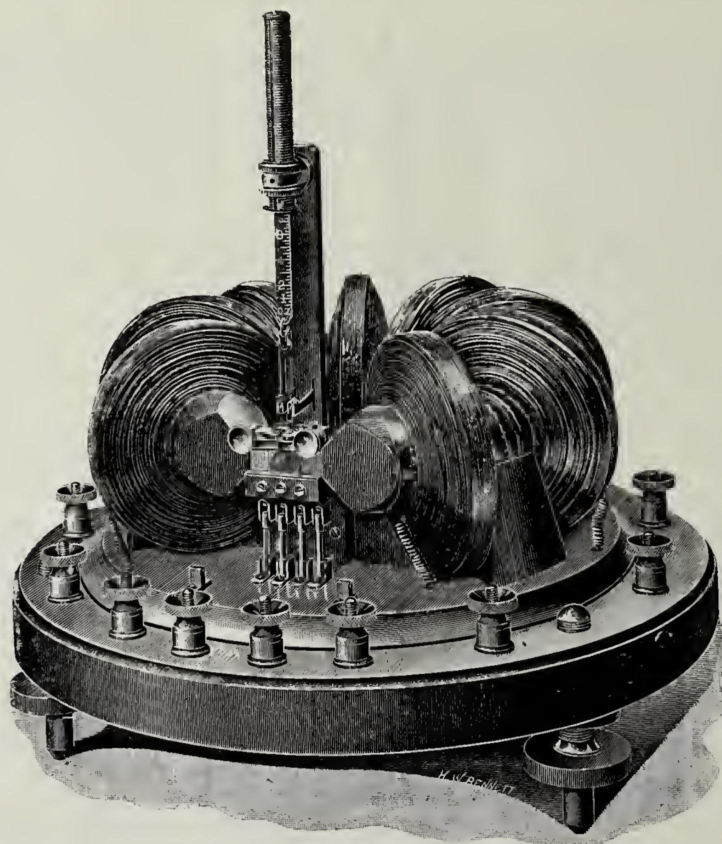


Fig. 223. — Oscillographe Duddell.

Le galvanomètre est disposé de manière à donner une déviation constamment proportionnelle à la valeur instantanée de l'intensité du courant à étudier.

Le moteur synchrone porte un miroir analyseur qui sépare les déviations successives de l'oscillographe et permet de les observer en les étalant sur une courbe qui est précisément celle du courant. Le galvanomètre Duddell est basé sur le principe du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

Il se compose d'un anneau de fer doux, disposé horizontalement sur un socle muni de vis calantes. En un point, l'anneau est coupé de manière à laisser subsister un entrefer dans lequel se meut le cadre du galvanomètre.

L'anneau de fer est recouvert de huit bobines magnétisantes, excitées par le courant de quelques accumulateurs, et remplace l'aimant ordinaire.

Les dimensions de l'anneau sont telles que cet électro-aimant est très saturé. De cette façon, le champ magnétique est pratiquement invariable, même si le courant d'excitation n'est pas tout à fait constant.

Suivant le courant dont on dispose, on couple en série ou en quantité les diverses bobines magnétisantes, en reliant convenablement leurs bornes.

Le cadre galvanométrique (*fig.* 224) se compose d'une bande très mince et très étroite en bronze phosphoreux qui, après s'être repliée en passant sur une poulie P, vient s'attacher par ses deux extrémités aux bornes $s'$, $s'$, situées à la partie inférieure de l'anneau de fer.

La poulie, tirée vers le haut par un ressort dynamométrique, exerce une tension *égale* sur les deux côtés $s$, $s$, du cadre. Comme on peut le voir à la partie supérieure de la figure 223, un système de vis et d'écrous permet de faire varier la tension exercée sur la poulie P et, par suite, de modifier la durée d'oscillation propre du cadre mobile.

Des chevalets K, L limitent la partie du cadre susceptible de vibrer quand on lance un courant périodique dans l'oscillographe.

Le miroir M est très léger ; il est collé sur les deux branches de la bande de bronze et sert à apprécier l'amplitude des déviations.

Quand la bande est convenablement tendue, la période d'oscillation du cadre est d'environ 0,0001 seconde ; elle est donc insignifiante eu égard à la fréquence des courants alternatifs industriels.

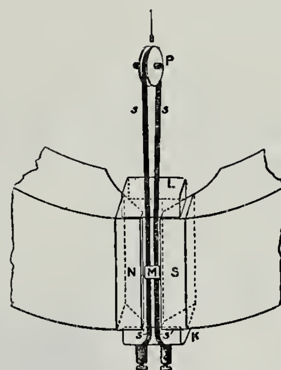


Fig. 224. — Cadre galvanométrique de l'oscillographe Duddell.

Le cadre, réduit ainsi à une spire, a une résistance négligeable ; sa self-induction est également négligeable et la sensibilité largement suffisante à cause de la valeur élevée du champ magnétique de l'électro-aimant.

Le galvanomètre que représente la figure 223 comprend en réalité deux cadres indépendants, placés à côté l'un de l'autre et portant chacun leur miroir.

Il est possible, dans ce cas, de relever simultanément des courbes de tension et d'intensité de courants.

Un miroir fixe, placé entre les deux premiers, donne la ligne de déviation nulle, ligne prise pour axe des $x$.

Une petite cage vitrée protège l'ensemble du système mobile et contient le liquide qui sert à en amortir les oscillations. Ce liquide est ordinairement de l'huile de vaseline. Le moteur synchrone (*fig.* 225) ne présente rien de bien spécial.

Il se compose de deux électro-aimants en fer à cheval, placés en regard, et dont les noyaux, en tôles isolées, sont recouverts de bobines excitées par le courant à étudier.

Entre les pôles de ces électros, tourne un induit formé d'un cylindre de buis monté sur un axe et sur lequel sont disposées quatre petites tiges de fer doux, encastrées dans des rainures creusées suivant quatre génératrices à angle droit du cylindre. Un frettage en fil de soie gomme-laquée maintient les tiges de fer en place.

Quand le synchronisme est établi, deux des tiges diamétrales se présentent en regard des pôles, lorsque le courant est à son maximum positif; les deux autres tiges se présentent devant

les mêmes pôles, à la demi-période suivante, de sorte que l'induit fait une demi-révolution par période et tourne à la moitié de la vitesse correspondant au synchronisme.

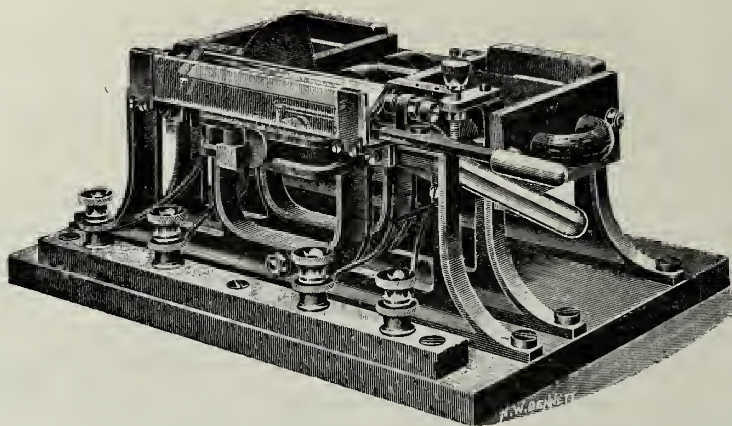


Fig. 225. — Moteur synchrone de l'oscillographe Duddell.

Cet induit agit, par l'intermédiaire d'une came, sur le miroir monté sur pointes et lui fait décrire un mouvement oscillatoire synchrone avec le courant et d'une amplitude de quelques degrés.

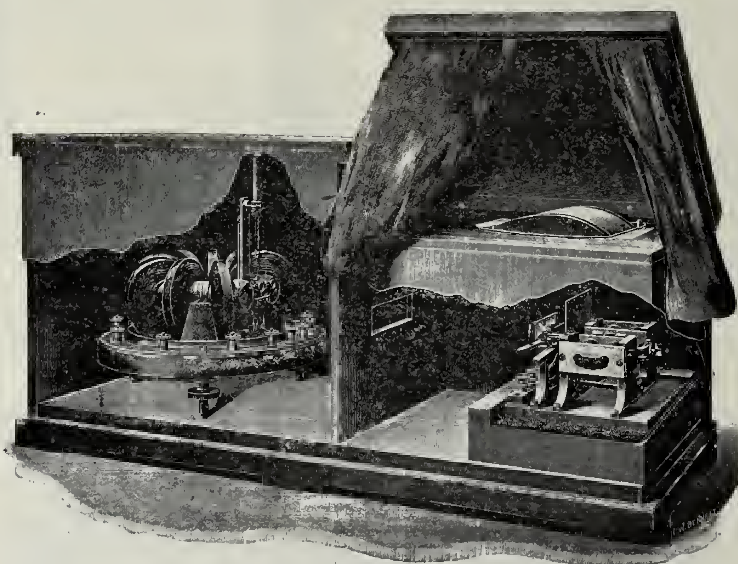


Fig. 226. — Installation de l'oscillographe Duddell.

Les poignées que l'on aperçoit sur la figure 225 servent, l'une à régler le miroir, l'autre à faciliter l'obtention du synchronisme du moteur.

La figure 226 montre la disposition générale des instruments.

L'oscillographe, placé au fond d'une caisse en bois, reçoit la lumière venant d'une lanterne à projection. Le pinceau lumineux a la forme d'une fente étroite et longue.

En venant se réfracter finalement dans la lentille cylindrique, ce pinceau se réduit à un point très brillant qui dessine la courbe du courant.

Sur la surface cylindrique de la lentille, il est possible de tendre une feuille de papier photographique ou du papier quadrillé transparent. Dans ce dernier cas, on trace la courbe avec un crayon, en s'abritant sous le voile noir qui surmonte la caisse du moteur synchrone.

Le courant continu qui excite l'électro-aimant du galvanomètre est de 0,25 ampère sous 100 volts.

Des fils fusibles, placés dans de petits tubes de verre, servent à protéger l'oscillographe.

**Rhéographe Abraham.** — Cet instrument, construit et exposé par M. J. Carpentier, de Paris, est destiné à observer et à enregistrer les courbes des courants alternatifs.

Il comporte trois organes essentiels : le rhéographe ou galvanomètre à période d'oscillation très longue, la table de compensation et le moteur synchrone avec l'appareil d'observation.

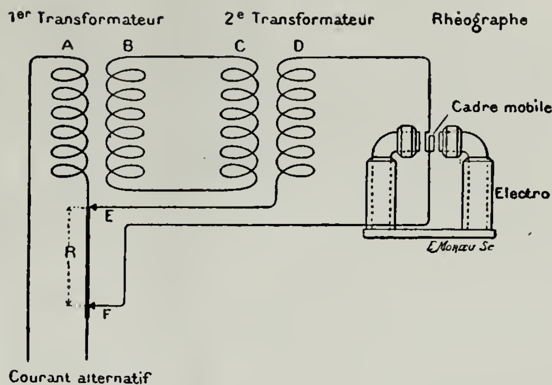



Fig. 227. — Disposition schématique du rhéographe Abraham.

Le rhéographe est un galvanomètre d'Arsonval dont le cadre mobile, de très faibles dimensions, est placé dans le champ magnétique très puissant d'un électro-aimant. La période des courants à étudier doit être très petite par rapport à celle d'oscillation du rhéographe : c'est donc l'inverse de ce que doit réaliser le galvanomètre-oscillographe.

La table de compensation comprend plusieurs organes qui ont pour mission d'envoyer dans le cadre mobile du rhéographe des courants proportionnels au courant à étudier, mais convenablement transformés.

Le cadre mobile, pour suivre exactement les oscillations rapides d'un courant alternatif, doit être soumis continuellement à des accélérations à tout moment proportionnelles à la valeur instantanée du courant.

Cette condition est réalisée en envoyant dans le cadre non pas le courant lui-même, mais un courant doublement transformé ; le double transformateur prévu à cet effet constitue la partie principale de la table de compensation.

Comme le montre schématiquement la figure 227, le courant à étudier passe dans le primaire A d'un transformateur sans fer et constitué par une bobine plate de grand diamètre. Le secondaire B se trouve placé au-dessus de lui.

Le second transformateur a ses enroulements primaire et secondaire C et D roulés sur une même bobine placée au centre du premier transformateur et susceptible de prendre des inclinaisons variées par rapport à celui-ci. Les enroulements du second transformateur ont, d'ailleurs, même nombre de spires.

Au courant de second ordre induit dans le secondaire D, on superpose une fraction du courant principal et un courant n'ayant subi que la première transformation.

Pour y parvenir, on règle la position des curseurs E, F mobiles sur une résistance R non inductive, qui se trouve ainsi montée en série avec le deuxième secondaire D et le cadre du rhéographe. On obtient ainsi dans ce dernier la fraction du courant principal nécessaire.

Quant au courant n'ayant subi que la première transformation, il est développé dans le secondaire D par l'induction provenant du primaire A. On règle la valeur du courant ainsi induit en D en inclinant convenablement la bobine D.

Pour arriver à une compensation rigoureuse, on observe la forme d'un courant périodiquement interrompu et l'on agit sur les curseurs E, F et sur l'inclinaison de la bobine D, jusqu'à ce que la courbe obtenue soit celle que doit présenter un courant continu intermittent, tel que le fournit un diapason fonctionnant comme interrupteur.

L'appareil d'observation se compose d'une chambre photographique et d'un système de

deux fentes, l'une verticale et fixe, l'autre déplaçable et qui, placée perpendiculairement à la première, donne un point lumineux.

En réalité, la deuxième fente est remplacée par un système de fentes tracées sur un disque tournant et ayant la forme de développantes de cercle.

Un moteur synchrone, alimenté par le courant à étudier, fait mouvoir ce disque.

Grâce à la forme des fentes de celui-ci, le point lumineux se déplace verticalement et proportionnellement au temps quand le disque tourne.

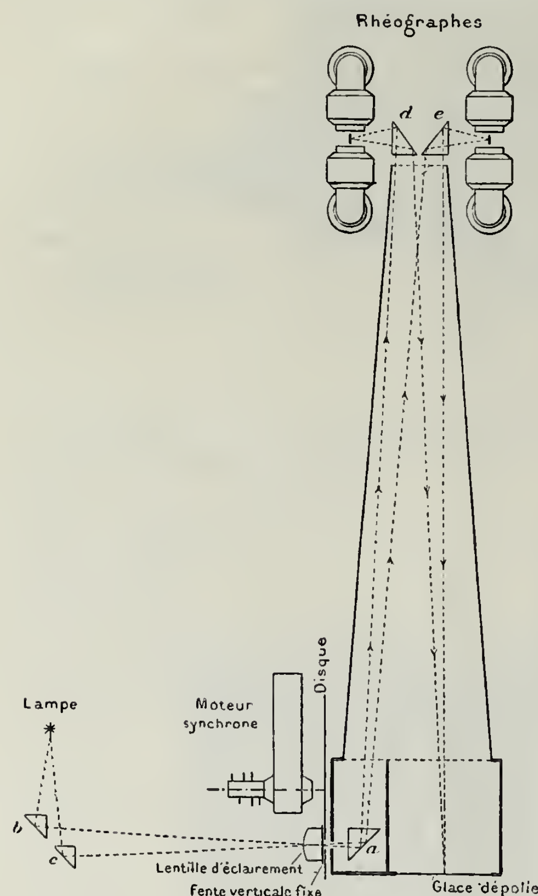



Fig. 228. — Installation du rhéographe Abraham.

Le point lumineux, mobile verticalement, est réfléchi sur le miroir du rhéographe qui le déplace horizontalement, suivant la valeur de l'intensité du courant, et renvoie sur l'écran un point qui, donnant la résultante des mouvements verticaux et horizontaux, fournit la courbe du courant. L'arbre du moteur synchrone porte un collecteur qui permet de le lancer avec du courant continu à la vitesse du synchronisme pour l'*accrocher*. Cet arbre porte aussi un interrupteur qui sert à couper périodiquement le courant de deux ou trois accumulateurs intercalés à la place de la source à étudier, au moment du réglage, dans le circuit de la table de compensation.

Le courant périodiquement interrompu ainsi obtenu sert à régler convenablement la position des curseurs E, F et l'inclinaison du second transformateur.

La figure 228 montre schématiquement l'ensemble de l'installation du rhéographe Abraham. A l'Exposition où il fonctionnait, il y avait deux rhéographes : l'un servait pour déterminer la courbe d'intensité d'un courant alternatif et l'autre pour la courbe de sa tension. Une lampe, accompagnée de deux prismes à réflexion totale $b$, $c$, envoie deux rayons qui, après avoir traversé un jeu de lentilles condensatrices, la fente verticale fixe et celles du disque, sont renvoyés par le prisme $a$ sur les prismes $d$, $e$. Les rayons frappent les miroirs des rhéographes, situés à gauche et à droite, et reviennent, par les prismes $d$, $e$, pour tomber sur l'écran, où ils forment deux images ayant le même axe des temps.

Chaque rhéographe est accompagné de sa table de compensation et, disposant ainsi d'un appareil double, on peut observer et photographier simultanément les courbes de tension et d'intensité des courants alternatifs.

**Enregistreur de courbes pour courants alternatifs.** — Cet instrument, construit par la maison Stieberitz, de Dresde, comprend un galvanomètre-oscillographe du genre de l'appareil Blondel.

C'est un galvanomètre du système dit à *arête de poisson* et qui se compose d'un aimant vertical en fer à cheval à la partie supérieure duquel est fixée la bobine.

Au centre de celle-ci se trouve l'équipage mobile formé d'une petite lame d'acier coupée dans un ressort de montre. Sur celle-ci est fixé un miroir minuscule. La durée d'oscillation de cet équipage se réduit à 0,0001 seconde.

Le point lumineux brillant, fourni par une lentille éclairée par une lampe à arc, frappe le miroir du galvanomètre et revient sur une feuille de papier sensible.

L'appareil dessine une courbe complète toutes les deux secondes pour un courant de fréquence de 100 périodes par seconde.

Le moteur synchrone qui fait dérouler le papier ne présente pas de particularités. La courbe qui met deux secondes à s'enregistrer représente la valeur moyenne de 100 périodes consécutives.

**Appareil du professeur Hoor pour relever les courbes de courants alternatifs.** — Cet instrument, construit et exposé par la Société Ganz, de Budapest, permet de relever par points les courbes de courants périodiques; il est basé sur la méthode du contact instantané, imaginée par M. Joubert en 1889. Un anneau en bronze est entraîné par un moteur synchrone ou au moyen d'un fort pointeau triangulaire enfoncé dans le bout de l'arbre de l'alternateur dont on veut relever les courbes de courant. Sur cet anneau est fixé un cylindre d'ébonite portant les contacts. Les frotteurs sont fixes et l'on peut, au moyen d'une graduation, relever leur position exacte.

Les lectures se font, comme d'ordinaire, avec un galvanomètre apériodique et un condensateur.

L'appareil porte deux systèmes de contacts, ce qui permet de relever la courbe de tension en même temps que celle de l'intensité.

L'instrument complet ne pèse que 3,5 kilogrammes et peut être tenu à la main comme un compteur de tours.

Deux observateurs peuvent relever les courbes en quelques minutes. L'un observe le galvanomètre et l'autre déplace les balais autour du tambour mobile en notant chaque fois l'angle marqué par un index.

## IX

# INSTRUMENTS DE MESURES MAGNÉTIQUES

Les essais magnétiques des fers et aciers, entrant dans la construction des machines et appareils électriques, tendent à se généraliser, depuis, surtout, que des instruments industriels ont été réalisés, permettant ainsi aux constructeurs d'effectuer les essais par des méthodes faciles.

Les indications données par ces instruments ont une réelle valeur et les renseignements qu'ils fournissent peuvent éviter aux constructeurs de graves mécomptes.

Ces instruments sont les *perméamètres* et les *hystérésimètres*.

Pour déterminer la perméabilité et le coefficient d'hystérésis d'un échantillon de fer par la méthode la plus précise, il est indispensable d'avoir recours à la méthode balistique ; mais cette méthode nécessite des opérations assez longues; aussi les constructeurs ont-ils cherché à réaliser des instruments, appelés *perméamètres*, qui permettent de comparer rapidement la perméabilité d'un échantillon quelconque à un échantillon type, préalablement étudié une fois pour toutes par la méthode balistique. De même, les hystérésimètres servent à comparer les pertes hystérétiques de deux échantillons, dont l'un, servant de type, a été étudié par la méthode balistique.

### PERMÉAMÈTRES

**Perméamètre d'induction Hopkinson.** — M. J. Carpentier avait construit et exposé un perméamètre Hopkinson dont la figure 229 montre la disposition schématique.

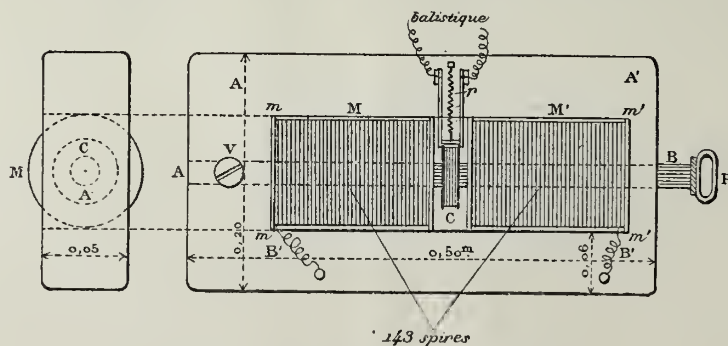



Fig. 229. — Perméamètre d'induction Hopkinson.

Cet instrument est constitué par un cadre en fer forgé A'A'B'B', qui reçoit l'échantillon AB à étudier, placé dans un évidement pratiqué à cet effet.

Cet échantillon a la forme d'un barreau cylindrique et pénètre dans les deux petits côtés du cadre, à travers des trous percés à cet effet dans la masse. L'échantillon doit entrer à frottement doux dans ces trous, de manière à réduire au minimum la réluctance des joints en ces points. Il est coupé en son milieu et les surfaces en contact sont parfaitement dressées.

Deux bobines magnétisantes M, M' entourent les deux parties de l'échantillon ; elles sont fixées

au cadre par leurs joues $m$, $m'$ et sont séparées par un espace occupé par une petite bobine plate C. Cette bobine recouvre aussi l'échantillon à l'endroit où il est coupé et un dispositif à ressort $r$ fait sortir brusquement la bobine de sa place, lorsqu'en tirant sur la poignée P on retire la partie de droite du barreau, dont la partie de gauche doit rester en place, maintenue solidement par le serrage de la vis V.

La bobine C porte un enroulement en fil fin qu'on relie à un galvanomètre balistique.

Pour effectuer une mesure de perméabilité, on met en place la bobine C, appelée *bobine d'épreuve*, autour de l'échantillon et on l'y maintient en poussant sur la poignée P de manière à bien appliquer l'une contre l'autre les sections des demi-éprouvettes.

On excite les bobines M, M' et l'on mesure l'intensité du courant. On tire ensuite vivement sur la poignée P; l'arrachement se produit, et la bobine C est brusquement rappelée par son ressort $r$.

Pendant ce déplacement, elle subit une variation de flux de $\Phi$ à zéro, variation qui se traduit par une certaine élongation $\varepsilon$ du galvanomètre balistique.

En répétant l'expérience un certain nombre de fois avec des courants d'intensité différente dans les bobines M, M', on obtient une série d'élongations qui permettent de tracer la courbe des inductions $\mathfrak{B}$ en fonction de la force magnétisante $\mathcal{F}$. Pour chaque groupe de valeurs de $\mathfrak{B}$ et de $\mathcal{F}$, on obtient la perméabilité $\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathcal{F}}$.

Avec cet instrument, on peut également employer un échantillon d'une seule pièce. Dans ce cas, la bobine C reste constamment enfilée sur le barreau et on produit la variation de flux en inversant brusquement le sens du courant qui traverse les bobines M, M'.

La variation de flux est $+\Phi$ à $-\Phi$; elle est donc double de celle obtenue dans le cas précédent. L'élongation du galvanomètre, pour une même intensité $I$ du courant magnétisant, est donc également doublée; cette disposition est plus avantageuse que la précédente.

Le cadre A'B' étant de grande section et d'une certaine longueur, on peut, sans trop d'erreur, négliger sa réluctance propre. Il est cependant possible d'en tenir compte dans l'expression de $\mathcal{F}$ en augmentant, dans le calcul, la longueur $l$ de la barre de 3 0/0 environ.

**Perméamètre à arrachement Carpentier.** — Cet instrument, construit par M. J. Carpentier, donne rapidement des résultats, lorsqu'on ne recherche pas une grande précision. Il se compose (*fig.* 230) d'un cadre en fer P de section notablement plus grande que celle de l'échantillon AB qui affecte la forme cylindrique. Ce cadre est analogue, d'ailleurs, à celui de l'appareil d'Hopkinson. En A, l'extrémité de l'échantillon est parfaitement dressée ainsi que la portion du cadre contre laquelle elle s'applique. En B, l'échantillon traverse à frottement doux l'épaisseur du cadre P. Une bobine magnétisante M entoure l'échantillon qui se termine par une pince B.

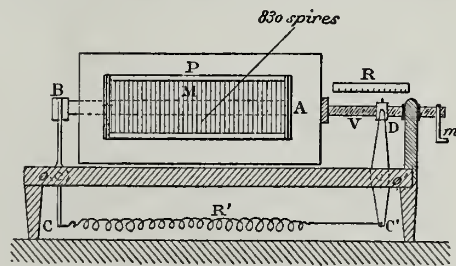


Fig. 230. — Perméamètre à arrachement J. Carpentier.

L'effort de traction nécessaire pour produire l'arrachement s'obtient en tournant la manivelle $m$ qui commande la vis V.

Ce mouvement de rotation produit le déplacement d'un écrou D, muni d'un index mobile devant la règle divisée R.

En se déplaçant vers la gauche, l'écrou D tire en B sur l'échantillon par l'intermédiaire des balanciers BC, DC' articulés en $o$ et $o'$. La tension du ressort peson R' mesure l'effort.

Pour faire un essai, on excite la bobine avec un courant d'intensité connue et on applique exactement en A l'extrémité de l'échantillon, de manière à avoir une répartition uniforme du flux dans toute la surface de contact A. On tourne lentement la manivelle $m$ jusqu'au moment où se produit l'arrachement.

La valeur de $\mathcal{F}$ est donnée par les indications de l'ampèremètre et la connaissance du nombre de spires de la bobine.

La perméabilité a pour expression :

$$\mu = \sqrt{\frac{8\pi f \cdot 981}{\mathcal{F}^2 S}},$$

$f$ étant l'effort d'arrachement mesuré en R et exprimé en grammes et S étant la section en $cm^2$ de l'échantillon.

$\mathcal{F} = 0{,}4\ \pi ni$, $n$ étant le nombre de spires par centimètre de la bobine M et $i$ étant l'intensité du courant en ampères. Toute la précision dépend du dressage plus ou moins parfait des surfaces en contact A.

Pour une force magnétisante $\mathcal{F}$ donnée, l'effort est, en effet, *minimum* quand le flux est uniforme en A et l'on voit que l'on peut trouver pour $f$, et, par conséquent, pour $\mu$, des valeurs d'autant plus élevées que le dressage des surfaces est moins parfait et le contact en A moins intime.

Comme c'est le cas qui peut se présenter le plus fréquemment, il faut s'attendre à trouver souvent des perméabilités un peu trop fortes.

**Perméamètre de torsion, modèle J. Carpentier.** — Cet instrument, construit et exposé par M. J. Carpentier, est destiné à la mesure rapide de la perméabilité des échantillons de fer.

Comme le montre la figure 231, il se compose essentiellement d'un anneau de fer doux C, dont la section transversale *abcd* est très grande par rapport à celle de l'échantillon à essayer.

L'anneau est coupé de façon à laisser subsister en D et E deux entrefers de même largeur $l$. En D, l'entrefer est rempli par une cale en bronze, tandis qu'en E il est occupé par une petite aiguille aimantée $f$, dont deux butées limitent les déplacements.

Cette aiguille est suspendue par des fils de torsion R qu'on manœuvre en agissant sur un bouton moletté F.

L'aiguille porte un index permettant d'apprécier son orientation. Elle se déplace dans de l'huile, celle-ci servant à rendre les oscillations apériodiques. Toute cette partie de l'appareil est montée dans un tube T' qui se place en E perpendiculairement au plan de l'anneau C. L'échantillon, de dimensions données, est figuré en AB. Il se place suivant un diamètre AB perpendiculaire à l'axe DE des entrefers et se trouve entouré d'une bobine magnétisante M.

Pour mettre cet échantillon en position, on l'enfile dans la bobine en le faisant passer par les trous A', B', percés dans l'anneau.

Quand on excite la bobine M, il se développe un flux qui traverse le barreau AB et les deux demi-anneaux.

Les flux dans ces demi-anneaux sont égaux à cause de l'égalité des entrefers D, E et valent chacun la moitié du flux total dans l'échantillon.

Le flux qui traverse l'entrefer E tend à orienter l'aiguille $f$ parallèlement à lui. On donne aux fils R une torsion suffisante pour ramener l'aiguille dans une direction $r$ perpendiculaire à celle du flux. Cette torsion mesure la valeur de ce dernier et elle lui est proportionnelle.

L'appareil est complété par une boîte de résistance à manettes figurée en R' et qui comprend, en outre, un inverseur I et un ampèremètre F. Ce dernier a une graduation en ampères qui sert à vérifier son étalonnage et porte, de plus, une graduation en gauss, tracée en fonction de l'intensité du courant et du nombre de spires de la bobine M.

Pour tenir compte de la portion de force magnétisante $\mathcal{F}$ nécessaire à l'aimantation de l'anneau C, force qui est constante pour une induction $\mathcal{B}$ donnée, il faut faire subir une correction aux lectures $\mathcal{F}$ de l'ampèremètre. Il est également nécessaire de tenir compte de l'influence de l'hystérésis.

A cet effet, la tête de torsion F porte deux index diamétraux $i$, $i'$, mobiles simultanément devant les deux graduations tracées sur le tambour T.

L'une des graduations fait connaître directement les valeurs de $\mathcal{B}$ et l'autre celle de la constante C qu'il faut, pour chaque valeur de $\mathcal{B}$, retrancher des lectures $\mathcal{F}$.

D'autre part, le tambour T peut tourner sur lui-même à frottement dur, afin de permettre le déplacement des zéros de ses graduations.

Voici comment on procède à une mesure :

L'échantillon étant mis en place, on fait passer un courant dans la bobine M et on règle sa valeur au moyen de la boîte de résistances R′, de manière à amener l'ampèremètre à une valeur approximative $\mathcal{F}$ de la force magnétisante choisie. On tourne la tête F jusqu'à ce que l'aiguille *f* arrive à son repère *r*, dans une position perpendiculaire à celle du flux en E. On amène le zéro de la graduation $\mathcal{B}$ du tambour sous l'index *i* et on inverse le courant.

Il suffit alors de tordre les fils R de suspension de l'aiguille *f* jusqu'à ce que l'index de celle-ci revienne devant son repère *r*. Pendant cette opération, on a soin de ne plus toucher au tambour T.

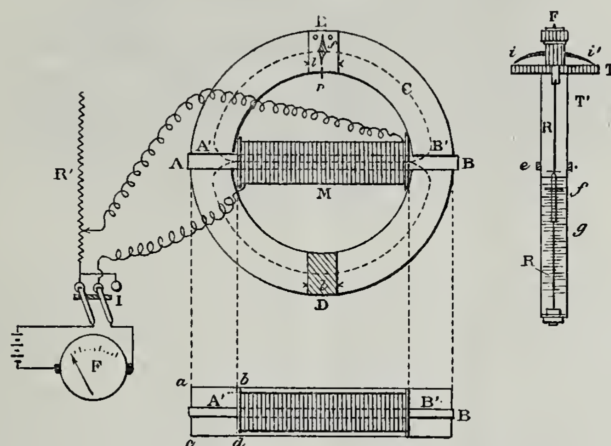



Fig. 231. — Perméamètre de torsion J. Carpentier.

L'index *i* fait connaître directement la valeur de $\mathcal{B}$, tandis que l'index *i′* indique la correction C qu'il faut retrancher de la lecture $\mathcal{F}$ sur l'ampèremètre. La perméabilité correspondant à la force magnétisante $\mathcal{F}$ — C, employée réellement pour l'échantillon seul, est alors :

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{F} - C}.$$

On peut tracer une courbe des valeurs de $\mu$, en répétant l'expérience un certain nombre de fois avec des valeurs de $\mathcal{F}$ — C convenablement choisies.

L'échantillon, ajusté à frottement doux dans l'anneau C, peut être cylindrique ou de forme prismatique ; le courant magnétisant est fourni par une pile constante ou par quelques accumulateurs.

En pratique, la bobine M porte deux enroulements, de chacun 730 spires, qui peuvent être groupés en série ou en parallèle. Le diamètre moyen de l'anneau C est d'environ 15 cm.

Un épaulement *e*, soudé au tube T′, sert à amener l'ensemble de l'aiguille *f* et de ses accessoires dans une position bien déterminée lorsqu'on le met en place dans l'ouverture E.

L'appareil est livré avec le barreau type qui, étudié par le constructeur, a servi à étalonner le perméamètre.

Il y a lieu de noter que l'aiguille *f*, restant toujours, grâce aux butées, à peu près perpendiculaire à la direction du flux, n'en subit pour ainsi dire pas l'influence. Son aimantation propre reste donc très longtemps constante ; d'ailleurs, si elle variait, il serait facile de déterminer la correction qu'il faudrait faire subir aux mesures. Il suffirait, en effet, de faire un essai avec le barreau étalon dont le constructeur fournit la courbe des perméabilités.

**Balance magnétique du Bois.** — Cet instrument, dont les figures 232 et 233 montrent une vue d'ensemble et un croquis théorique, est construit et exposé par la maison Siemens et Halske.

Il se compose de deux gros blocs en acier C, C′, dont les parties supérieures ont même section et sont parfaitement dressées.

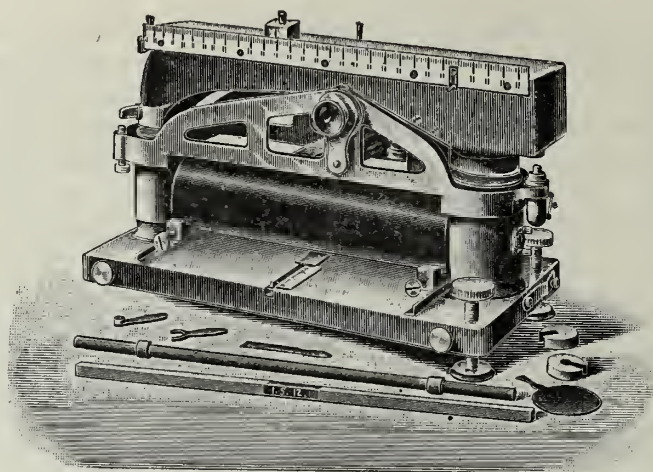


Fig. 232. — Balance magnétique du Bois.

L'échantillon AB, entouré d'une bobine magnétisante M, réunit les deux blocs qu'il traverse.

Afin que le contact soit intime entre le barreau et les blocs, le barreau est serré entre deux demi-cônes en fer, qu'on visse entre celui-ci et les blocs au moyen d'une clé.

Au-dessus des blocs C, C′, se trouve une masse DE en acier coulé, montée sur couteaux I. Le côté E est plus lourd que le côté D, afin d'obtenir l'équilibre de ce système de fléau malgré la légère excentration des couteaux I supportés par la traverse H.

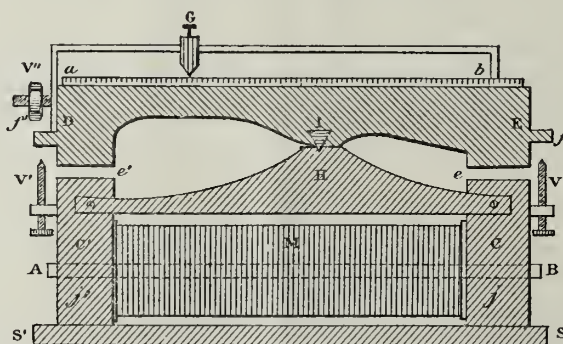



Fig. 233. — Détails de la balance magnétique du Bois.

En regard des parties supérieures des blocs C, C′, le fléau se termine par des épanouissements bien dressés et de même section que les blocs.

A la partie supérieure du fléau, on voit une tige le long de laquelle on peut déplacer le contrepoids G, dont l'index est mobile devant les divisions d'une règle graduée *ab*.

Les surfaces en regard des blocs C, C′ et des épanouissements du fléau ne doivent jamais venir au contact. Il reste toujours entre ces parties un entrefer, dont l'épaisseur est de 1 mm du côté où le fléau est incliné.

Une cale de 1 mm d'épaisseur sert à vérifier cette condition.

Pour régler la balance, on place la cale en *e*, puis on appuie en E sur le fléau, de manière à la serrer. On agit enfin sur la vis V, jusqu'à ce qu'elle vienne toucher la butée *f*.

On opère de même du côté D, en transportant la cale en $e'$ et en agissant sur la vis V′ après avoir appuyé en D.

Le contrepoids G étant au zéro de sa graduation et la bobine M n'étant pas excitée, on amène la balance à l'équilibre en réglant la position du petit contrepoids V″.

Pour faire une mesure, on excite la bobine M avec un courant d'intensité connue. L'équilibre est détruit et on le ramène en déplaçant convenablement le contrepoids G.

La valeur de $\mathfrak{B}$ est proportionnelle à $\sqrt{d}$, $d$ étant la distance du poids G au zéro de l'échelle *ab*.

Les flux en *ee′* sont égaux ; si, cependant, le fléau s'infléchit du côté $e'$ quand on excite la bobine, cela tient à ce que l'excentrage des couteaux I rend inégaux les moments des couples.

L'échelle des indications peut être étendue, en ajoutant au poids G des rondelles de masse connue, visibles en bas de la figure 232, à côté de la cale de réglage.

Les échantillons sont cylindriques ou prismatiques. Dans les deux cas, leur section doit être de 49 mm² (diamètre du cylindre, 7,9 mm ; côté du carré, 7 mm).

Pour corriger les erreurs dues à l'hystérésis des blocs CC′ et du fléau DE, on porte les abscisses, dans le tracé des résultats, à partir d'une courbe située au-dessus de l'axe des $x$.

Cette courbe, dressée pour chaque instrument, est fournie par le constructeur.

Dans l'instrument exposé et dont la longueur est d'environ 50 cm, des boutons placés à proximité des couteaux permettent d'immobiliser le fléau pendant le transport. Les blocs sont indépendants du support du fléau et peuvent recevoir un petit déplacement au moyen de vis.

Ce déplacement a pour objet de les amener exactement à l'aplomb des épanouissements du fléau et d'éviter ainsi des efforts autres que ceux dirigés suivant la verticale. Un jeu de clés de serrage et des cônes pour barres cylindriques et carrées accompagnent cet instrument qui, fournissant des résultats exacts à 1 0/0 près, est véritablement remarquable de précision, malgré sa simplicité.

**Perméamètre du Dr Hubert Kath.** — Le principe sur lequel est basé cet instrument (*fig.* 234) a été indiqué en 1886 par M. Marcel Deprez. En Allemagne, le Dr Köpsel a également employé le même principe qui consiste à renverser la destination du galvanomètre Deprez-d'Arsonval.

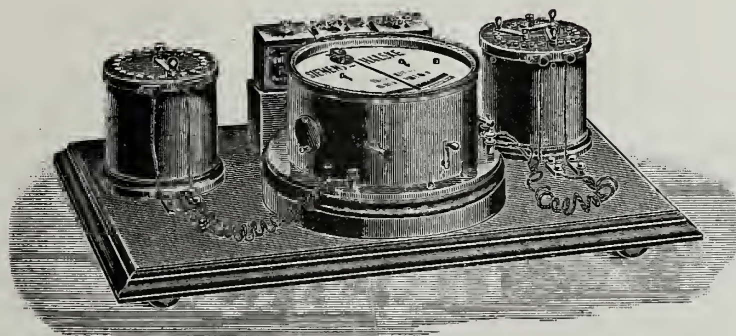


Fig. 234. — Perméamètre Hubert Kath.

Le Dr Hubert Kath a donné à l'instrument que construit la maison Siemens et Halske les dispositions de détail qu'il présente maintenant.

Comme le montre la figure 235, cet instrument se compose essentiellement d'un galvanomètre à cadre mobile, dont l'aimant est remplacé par un circuit magnétique excité par une bobine M.

L'échantillon, qui a la forme d'un barreau cylindrique AB, pénètre dans les trous percés à travers deux gros blocs de fer C, D. Ces blocs viennent embrasser le cadre mobile M et la réluctance de l'entrefer est diminuée par la présence du noyau de fer E.

Le barreau, bien ajusté, entre à frottement doux dans les ouvertures des blocs et des vis de pression $p$, $p'$ le maintiennent en place.

On fait passer dans le cadre mobile et par les ressorts spiraux antagonistes un courant d'intensité constante fourni par une pile S de trois éléments à liquide immobilisé, courant qu'un milliampèremètre $i$ permet de mesurer.

Cela fait, si on excite la bobine M, le cadre est dévié proportionnellement au flux dans l'entrefer, c'est-à-dire au flux développé dans le barreau.

Pour éliminer l'effet dû au flux propre des blocs C, D, ceux-ci sont recouverts de bobines M', M'', montées en série avec la bobine M et qui sont reliées de manière à diminuer le flux total exactement d'une quantité égale au flux dû aux blocs eux-mêmes.

Quand les bobines M, M', M'' sont excitées et que le barreau AB est enlevé, le cadre $m$, bien qu'étant traversé par un courant, ne doit pas dévier. Cette constatation indique que les bobines compensatrices M', M'' produisent exactement leur effet.

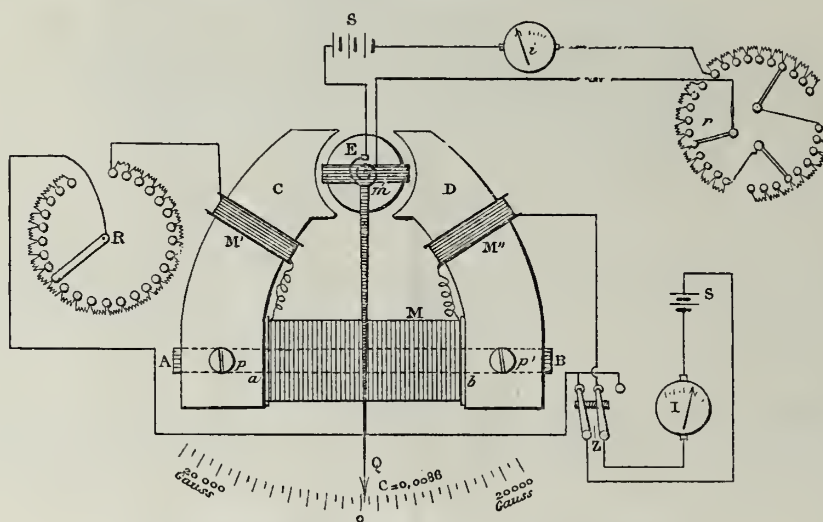



FIG. 235. — Schéma des connexions du perméamètre Hubert Kath.

Un rhéostat $r$ à trois manettes permet de régler avec précision l'intensité du courant dans le cadre.

Les manettes du rhéostat $r$, visibles à droite de la figure 235, agissent respectivement sur des centaines, dizaines et unités de résistance ; le réglage de l'intensité du courant dans le cadre peut donc être très précis.

A gauche de la figure, on aperçoit un autre rhéostat R servant à régler l'intensité du courant magnétisant fourni par quelques accumulateurs S. Un inverseur Z, placé dans le circuit des bobines M, M', M'', permet d'éliminer les effets dus à l'hystérésis.

Pour connaître l'intensité $i$ qu'il faut donner au courant qui traverse le cadre mobile $m$, on divise un coefficient (gravé sur le cadran du perméamètre) par la section du barreau essayé.

Le coefficient est variable d'un instrument à l'autre, mais il est toujours assez voisin de 0,0086. Si la section du barreau est de 1 cm², par exemple, l'intensité $i$ devra être de 0,0086 ampère.

Afin d'éviter tout calcul dans la détermination de la force magnétisante, la longueur active $ab$ du barreau est exactement de 12,56 cm $= 4\pi$cm. D'autre part, la bobine M a 1 000 spires, de telle sorte que la force magnétisante $\mathcal{F}$ vaut 100 fois l'intensité en ampères du courant I circulant dans les bobines M, M', M''.

Avec deux accumulateurs, la force magnétisante peut atteindre 150 gauss ; elle est doublée au besoin par l'emploi de quatre accumulateurs.

La résistance totale des trois bobines M, M', M'' est de 2,66 ohms environ. Pour faire un essai, on mesure la section du barreau à étudier, afin de déterminer l'intensité du courant constant à faire circuler dans le cadre mobile $m$, et on règle ce courant. On excite les bobines M, M', M'' et on s'assure que l'aiguille Q que porte le cadre ne dévie pas.

On met l'échantillon en place, puis on fait varier l'intensité du courant I dans les bobines M, M', M''. Ceci s'obtient en amenant la manette du rhéostat R successivement sur chaque plot. Pour chaque position de R, on note l'intensité du courant et la déviation de l'aiguille Q. On recommence finalement l'opération après avoir inversé le courant magnétisant.

Les valeurs obtenues servent à tracer la courbe de $\mathcal{B}$ en fonction de $\mathcal{H}$, courbe dite boucle d'hystérésis. L'échantillon cylindrique peut être remplacé par un autre, formé de tôles de fer, dont on superpose le nombre voulu pour avoir une section équivalente ou à peu près. La section de chaque tôle est mesurée séparément au palmer et l'intensité du courant dans le cadre mobile est réglée d'après la section totale trouvée pour l'échantillon.

**Perméamètre à spirale de bismuth.** — Avant de décrire cet instrument, exposé par MM. Hartmann et Braun, il est nécessaire de dire quelques mots de la spirale de bismuth, que représente la figure 236.

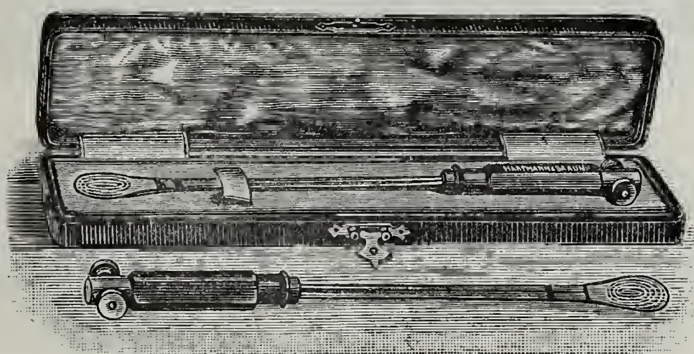



Fig. 236. — Spirale de bismuth du perméamètre Hartmann et Braun.

Cet instrument est formé d'un fil fin isolé en bismuth chimiquement pur, roulé en forme de spirale plate et protégé par deux petits disques de mica collés sur les faces de la bobine. Le diamètre de cette dernière est de 18 mm et son épaisseur est seulement de 1 mm.

La spirale de bismuth a ses extrémités reliées aux deux bornes placées sur le manche qui lui sert de support.

Grâce à ses faibles dimensions, la bobine peut être introduite dans l'entrefer d'une dynamo quelconque dont l'inducteur et l'induit sont traversés par des courants, l'induit étant naturellement immobilisé.

Quand la spirale de bismuth est traversée par un flux de force magnétique, sa résistance varie et la variation relative de cette résistance donne une mesure du flux, lorsque l'instrument a été convenablement étalonné.

La variation relative de résistance est d'environ 5 0/0 par 1 000 gauss. Elle est exactement indiquée par une courbe (*fig.* 237) livrée par le constructeur en même temps que la spirale.

Pour mesurer la variation relative de la résistance de la spirale, on fait usage d'un pont schématiquement représenté sur la figure 238.

Il se compose de deux fils calibrés, le long desquels peuvent se déplacer des curseurs $S_1$, $S_2$, $S_3$, mobiles devant des règles divisées.

En E est une résistance exactement égale à celle de la spirale de bismuth, cette résistance étant celle qui correspond à la température la plus basse à laquelle on s'en servira.

Entre A et B se trouve une bobine de 1 ohm.

La pile du pont se branche entre les points marqués « Batt », le galvanomètre entre ceux marqués « Galv » et la spirale entre les curseurs $S_1$, $S_3$.

La spirale de bismuth étant hors de tout champ magnétique, on met le curseur $S_1$ au zéro de son échelle et le curseur $S_2$ devant le chiffre qui correspond à la température de la spirale. Les divisions de la règle relative au curseur $S_2$ sont tracées en rouge.

On déplace le curseur $S_3$ jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro.

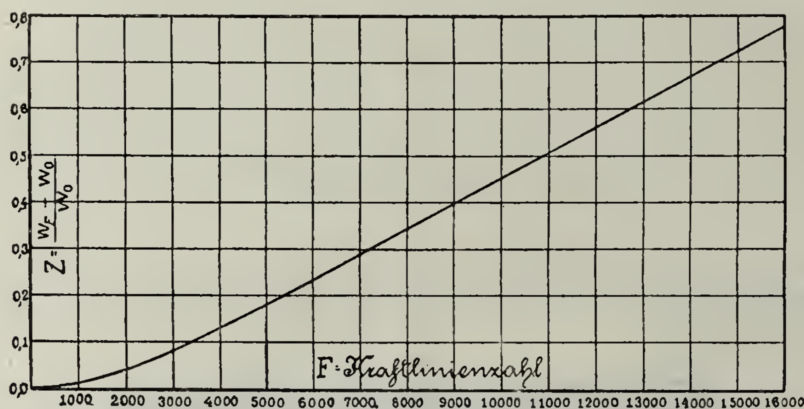



Fig. 237. — Courbe des flux en fonction de la variation de résistance relative de la spirale de bismuth.

Les curseurs $S_2$, $S_3$ restant à leur place, on soumet la spirale aux flux à mesurer et on constate que, pour ramener le galvanomètre au zéro, il faut déplacer le curseur $S_1$ jusqu'en C, par exemple.

La distance OC exprime la *variation relative* de la résistance de la spirale. Il reste à porter cette valeur en ordonnées sur la courbe (*fig.* 237) pour que l'abscisse du point correspondant fasse connaître le flux qui traversait le fil de bismuth.

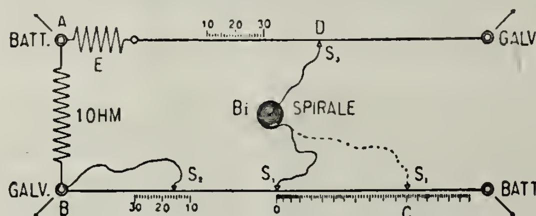



Fig. 238. — Schéma des connexions du pont double employé pour mesurer la variation de résistance de la spirale de bismuth.

Le perméamètre Hartmann et Braun est représenté figure 239. Il se compose d'un cadre en fer de grande section, dont les côtés les plus longs sont légèrement courbés.

Ce cadre, qui rappelle beaucoup celui de l'instrument d'Hopkinson, porte deux trous à travers lesquels on passe à frottement doux l'échantillon à expérimenter.

Celui-ci, comme on peut le voir en haut de la figure sur la coupe du cadre, est en deux morceaux séparés par la bobine en fil de bismuth dont l'épaisseur est de 1 mm.

Afin que la distance des deux parties de l'échantillon soit toujours la même, la bobine de bismuth est protégée par des disques en laiton et des ressorts en boudin font appuyer les morceaux de l'échantillon contre ces disques.

Une bobine magnétisante entoure le barreau ainsi que la spirale.

Quand on excite cette bobine, la résistance du bismuth varie et on mesure cette variation comme il a été dit ci-dessus.

Connaissant l'intensité du courant d'excitation, le nombre de spires de la bobine magnéti-

sante et la variation relative de résistance de la spirale, il est facile d'obtenir les valeurs de $\mathfrak{B}$ en fonction de $\mathfrak{F}$.

La figure 240 montre l'aspect d'ensemble de l'instrument complet.

Le cadre en fer est placé au milieu d'une planchette de 1,10 m de long.

En avant et en arrière cette planchette se trouvent les fils calibrés du pont ; $S_1$, $S_2$, $S_3$ sont les trois curseurs.

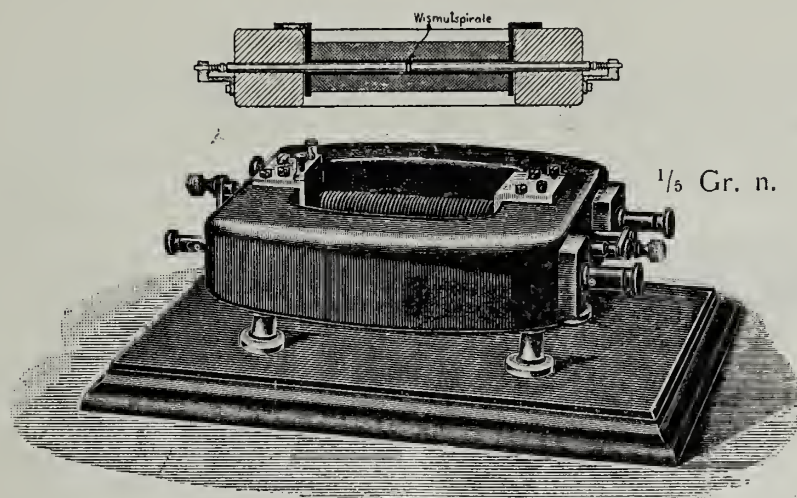



Fig. 239. — Perméamètre Hartmann et Braun.

A droite, on aperçoit le galvanomètre apériodique et la clé T à deux contacts successifs servant aux mesures de résistance.

A gauche, on remarque l'ampèremètre destiné à mesurer l'intensité du courant magnétisant, courant qu'on peut interrompre en S.

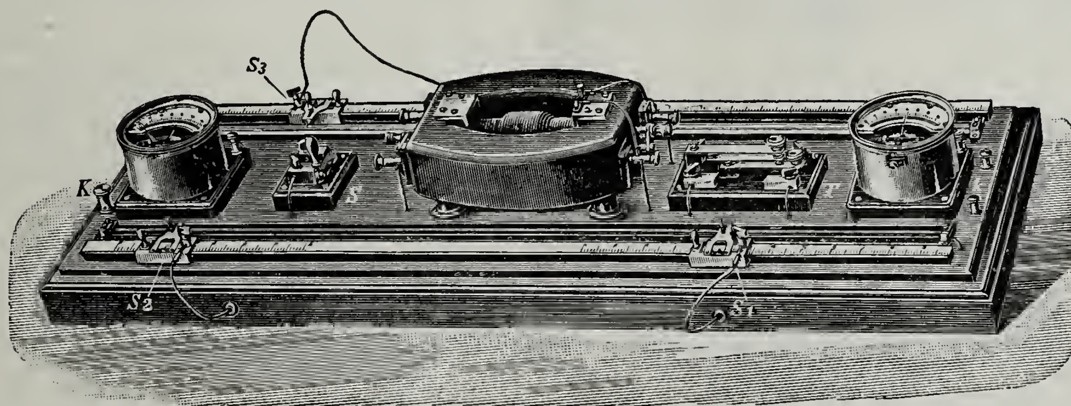



Fig. 240. — Instrument complet pour la détermination des qualités magnétiques du fer.

Ce courant, fourni par quelques accumulateurs, arrive aux bornes K, la pile du pont étant reliée aux bornes $k$.

Les indications fournies par cet instrument sont très exactes et la manipulation en est fort simple.

Il y a lieu de noter que les essais doivent être cependant exécutés rapidement afin d'éviter tout échauffement de la bobine de bismuth dont la température serait alors inconnue. Si ce fait se produisait pendant les expériences, les résultats seraient naturellement erronés, puisque la

variation relative de résistance ne serait plus exclusivement due à l'action du flux sur le bismuth.

La longueur de la bobine magnétisante, mesurée entre les faces internes du cadre, est exactement de 12,56 cm.

Le diamètre du barreau à essayer est de 1 cm ; les faces en contact avec la spirale de bismuth doivent être soigneusement dressées.

### HYSTÉRÉSIMÈTRE

**Hystérésimètre Blondel-Carpentier.** — Un seul de ces instruments figurait à l'Exposition : c'était celui de MM. Blondel-Carpentier, construit et exposé par M. J. Carpentier (*fig.* 241).

Cet instrument est basé sur le principe suivant : pour aimanter une masse de fer, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie ; s'il n'y avait pas d'hystérésis, cette énergie se retrouverait entièrement à la désaimantation ; mais, par suite de l'hystérésis, une partie de l'énergie est absorbée et se retrouve sous forme de chaleur. Il s'ensuit que la mesure de l'énergie dépensée, lorsqu'on fait passer le fer par un cycle magnétique déterminé, peut servir à la mesure de l'hystérésis. Lorsqu'une masse de fer est soumise à l'action d'une force magnétisante telle que l'induction passe alternativement d'une valeur positive à la même valeur négative, la dépense d'énergie causée par l'hystérésis est donnée, pour chaque cycle et par centimètre cube de fer, en fonction de l'induction maximum atteinte $\mathfrak{B}$, par la formule de Steinmetz :

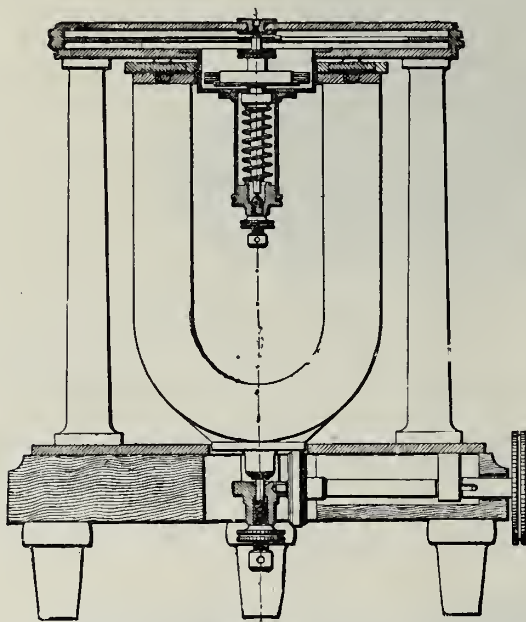


Fig. 241. — Hystérésimètre Blondel-Carpentier.

$$W = \eta \mathfrak{B}^{1,6}$$

La connaissance du coefficient $\eta$ suffit à caractériser le fer essayé et la détermination de l'hystérésis peut être ramenée à une seule mesure pour une grandeur connue de $\mathfrak{B}$. Pour comparer simplement des qualités de fer différentes, il suffit de faire les mesures avec une valeur constante de $\mathfrak{B}$.

L'hystérésimètre Blondel-Carpentier permet d'effectuer la mesure d'une autre manière : si on place un cylindre de fer doux dans un champ magnétique, son axe étant perpendiculaire aux lignes de force et si on fait tourner le champ autour de l'axe, on voit le cylindre tourner. Grâce à l'hystérésis, l'aimantation persiste dans le cylindre, dans la direction où elle se trouvait tout d'abord. La résistance au déplacement des lignes de force peut être mesurée et elle donne ainsi un moyen de déterminer la valeur de l'hystérésis.

Dans l'hystérésimètre Blondel-Carpentier, l'échantillon de fer à essayer est mis sous forme d'anneaux plats qui sont placés sur un support en laiton s'adaptant sur un arbre vertical. Cet arbre repose à sa partie inférieure dans une crapaudine et sa partie supérieure pivote dans une chape fixée au milieu de la glace servant de couvercle à l'instrument. Cet ensemble est porté par la platine supérieure et forme un ensemble rigide, de sorte que les anneaux de fer peuvent tourner avec l'arbre, mais ils sont ramenés constamment à la même position par un ressort hélicoïdal. Pour éviter les oscillations gênantes pendant que l'on effectue une mesure, le tube qui porte la crapaudine et qui contient l'arbre et le ressort est rempli de valvoline épaisse dont la viscosité est suffisante pour amortir les oscillations.

La position du fer est indiquée par un index qui se fixe à frottement sur l'arbre, au-dessus du porte-objet. Un cercle divisé, solidaire de la glace, permet de repérer la position de l'index et, comme ce cercle tourne avec la glace, on peut placer le zéro de la graduation où cela est nécessaire.

Le champ magnétique est produit par un aimant en fer à cheval, à branches verticales, reposant sur une crapaudine et guidé, dans le haut, par trois galets qui appuient sur la circonférence d'un disque solidement attaché à l'aimant. Cette disposition permet de faire coïncider rigoureusement l'axe de rotation de l'aimant avec l'axe géométrique des anneaux de fer et assure l'aimantation uniforme de ces derniers. Le pivot inférieur est surmonté d'un petit disque sur lequel vient appuyer un galet en cuir, commandé par un bouton moletté et une manivelle.

L'aimant a été choisi de manière à produire une induction maximum d'environ 10 000 gauss.

Pour effectuer un essai, on découpe l'échantillon de fer en forme d'anneaux de 55 mm de diamètre extérieur et de 38 mm de diamètre intérieur. On en superpose un nombre suffisant pour obtenir une épaisseur de 4 mm. Les disques ainsi obtenus, bien recuits, sont placés sur le support destiné à les recevoir où ils sont maintenus par des taquets ; le tout est ensuite monté sur l'arbre et une goupille rend la position du support invariable. On place ensuite l'index, puis la glace et l'instrument est alors prêt à fonctionner.

On fait ensuite tourner l'aimant à l'aide de la manivelle. Pendant cette rotation, la réaction due aux pertes hystérétiques exerce un couple sur les disques de fer dont l'ensemble tend à être entraîné dans le sens du mouvement. En tordant un ressort en boudin, on ramène les disques à leur position première et c'est la mesure de cette torsion qui fait connaître l'hystérésis relative des échantillons. L'aimantation changeant constamment de sens avec la position de l'aimant, on mesure ainsi l'*hystérésis tournante*, c'est-à-dire celle qui existe dans les induits de machines à courant continu. L'hystérésis ainsi mesurée est appelée tournante par opposition à l'hystérésis alternative à laquelle est soumise le noyau d'un transformateur.

Lorsque l'équilibre est obtenu, c'est-à-dire lorsque le couple de torsion du ressort fait équilibre au couple exercé par l'aimant, l'essai est terminé. En désignant par V le volume du fer essayé, par $w$ le couple du ressort exprimé en ergs par radian, par $\theta$ le double de l'angle de déviation, c'est-à-dire la lecture faite sur le cercle divisé exprimée en radians, et par $n$ le nombre de tours de l'aimant par seconde, on a :

$$W = \frac{\pi w}{V} \theta;$$

il suffit donc de multiplier la lecture par un coefficient numérique, déterminé une fois pour toutes, pour obtenir directement la perte en ergs par centimètre cube du fer essayé, à la valeur de $\mathfrak{B}$ donnée par l'aimant.

L'étalonnage de cet instrument se fait généralement au moyen d'un échantillon étudié préalablement par la méthode balistique ; on peut aussi déterminer le couple du ressort par la méthode des oscillations.

Avec l'hystérésimètre Blondel-Carpentier, les qualités hystérétiques des fers peuvent être appréciées à 5 0/0 près ; or, les méthodes balistiques donnent rarement plus de précision et les opérations de mesure sont plus pénibles.

X

# INSTRUMENTS DIVERS ET APPAREILS ACCESSOIRES POUR INSTALLATIONS DE MESURE ÉLECTRIQUE

## INSTRUMENTS DIVERS

Parmi les instruments de mesure qui n'ont pu être classés dans les chapitres précédents, nous citerons les suivants :

Un appareil transportable combiné pour effectuer les essais des câbles (résistance, résistance d'isolement et capacité), exposé par M. Th. Edelmann, de Munich ;

Une installation complète pour les essais de câbles, comprenant galvanomètre, échelle, shunt, boîte de résistances, commutateur, clés, condensateur étalon, etc., exposée par MM. Hartmann et Braun, de Francfort, qui présentaient également une voiture complètement installée et aménagée pour effectuer les mêmes essais.

**Instruments universels.** — On désigne ainsi certains instruments portatifs disposés pour permettre d'effectuer des mesures de tension, d'intensité, de résistance, d'isolement, etc.

*Galvanomètre universel Siemens et Halske.* — Cet instrument (*fig.* 242) présente la même disposition que l'ancien galvanomètre universel Siemens bien connu, mais avec cette différence que le galvanomètre astatique a été remplacé par un galvanomètre Deprez-d'Arsonval à cadre mobile monté sur pivots; le fil de la bobine mobile est roulé sur un cadre en cuivre rouge afin d'obtenir un amortissement atteignant presque l'apériodicité. Des spiraux en bronze phosphoreux amènent le courant au cadre mobile et servent à développer le couple résistant.

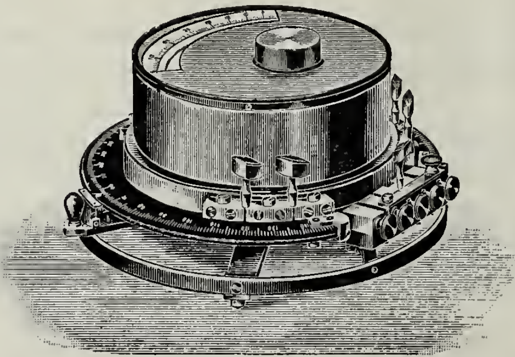


Fig. 242. — Galvanomètre universel Siemens et Halske.

L'aiguille se meut au-dessus d'une glace, ce qui permet d'éviter les erreurs de parallaxe.

Le cadre mobile a une résistance d'un ohm exactement et la graduation, en 150 parties égales, donne aussi bien des milliampères que des millivolts.

L'aimant permanent de ce galvanomètre est préparé de manière à conserver un moment magnétique bien constant.

La figure 243 montre le galvanomètre universel vu par-dessus. Le plateau en ébonite est muni, sur son pourtour, d'une gorge demi-circulaire dans laquelle est tendu un fil bien calibré,

qui occupe environ 300° de la circonférence du plateau. Les deux extrémités de ce fil aboutissent à deux butoirs.

Un bras, mobile autour du centre du plateau d'ébonite, se termine par un curseur, dont le contact en platine appuie sur le fil calibré. Le point de contact est repéré par la position d'un index solidaire du bras mobile, index se déplaçant devant une graduation tracée sur le bord du plateau.

Autour du galvanomètre se trouvent, de part et d'autre sur le devant, six plots aboutissant à des résistances de 1, 9, 90 et 900 ohms qui s'intercalent dans le circuit du galvanomètre en enlevant les chevilles correspondantes.

Deux autres plots, placés à la partie postérieure, peuvent être reliés par une cheville et servent à shunter le galvanomètre; enfin, cinq bornes, marquées I à V, permettent d'effectuer les connexions nécessaires entre l'instrument et les circuits extérieurs.

Les bornes II et V peuvent être mises en communication par une clé et les bornes III et IV peuvent être réunies directement par une cheville.

Le dessus du galvanomètre est formé d'une glace noire (*fig.* 243), sur laquelle sont tracés en blanc les divers schémas de montage correspondant aux différents usages de l'instrument. C'est une idée nouvelle et heureuse.

Des shunts ou des résistances additionnelles accompagnent le galvanomètre universel et peuvent se monter entre les bornes de l'instrument, afin d'en étendre les indications.

Pour l'usage, il est inutile d'orienter le galvanomètre suivant le champ terrestre, comme on était obligé de le faire autrefois lorsque ce galvanomètre était du système astatique. Il n'est pas non plus nécessaire de disposer l'ensemble sur vis calantes pour le placer bien horizontalement.

Les deux portions du fil calibré séparées par le contact à curseur déterminent le rapport des résistances des bras de proportion d'un pont de Wheatstone.

L'extrémité de droite du fil calibré est reliée au cadre mobile du galvanomètre et son extrémité de gauche aboutit à la borne III. La borne I est reliée à la manette du curseur et, par conséquent, au milieu des bras du pont.

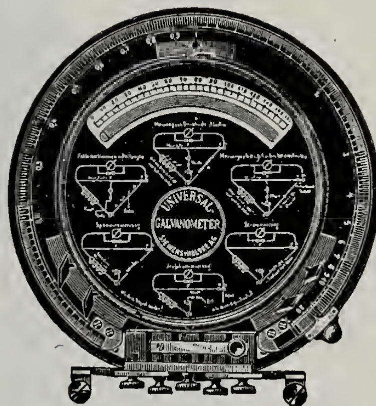


Fig. 243. — Galvanomètre universel Siemens et Halske. Vue de la face supérieure.

La borne II est en communication avec le premier plot de la série des résistances, dont le dernier plot est relié à une des extrémités du cadre mobile du galvanomètre, tandis que la borne IV est reliée à l'extrémité opposée de ce cadre. Enfin, à la borne V, se fixe le conducteur d'un des pôles de la pile, dont l'autre pôle est mis à la terre; une clé met en relation, lorsqu'on l'abaisse, la borne V avec la borne II.

*Caisse portative universelle Chauvin et Arnoux.* — Cet instrument (*fig.* 244) constitue un laboratoire complet de mesure électrique; il comprend :

1° Un pont double de lord Kelvin pour la mesure des faibles résistances;

2° Un pont de Wheatstone avec boîte de résistances à décades;

3° Un shunt de galvanomètre;

4° Un galvanomètre Deprez-d'Arsonval;

5° Trois shunts pour les mesures d'intensité jusqu'à 300 ampères;

6° Une échelle graduée.

Sur le devant de la caisse se trouvent sept boutons : les deux extrêmes à gauche sont marqués OHMS; les trois du milieu, AMPÈRES, et les deux extrêmes à droite, VOLTS. Ces boutons, par une simple pression, permettent d'effectuer toutes les connexions intérieures nécessaires pour les différentes mesures.

Des bornes, placées sur les bords de la plaque isolante servant de couvercle, reçoivent les divers conducteurs; des inscriptions abrégées indiquent l'affectation de chacune de ces bornes.

Le pont double de lord Kelvin est constitué par une tige de maillechort, placée au-dessus




Fig. 244. — Caisse universelle de mesure Chauvin et Arnoux.

d'une règle graduée et munie d'un curseur, et par deux séries de résistances étalonnées marquées PONTS. Deux bornes $r$, $x$, permettent de relier la résistance à mesurer.

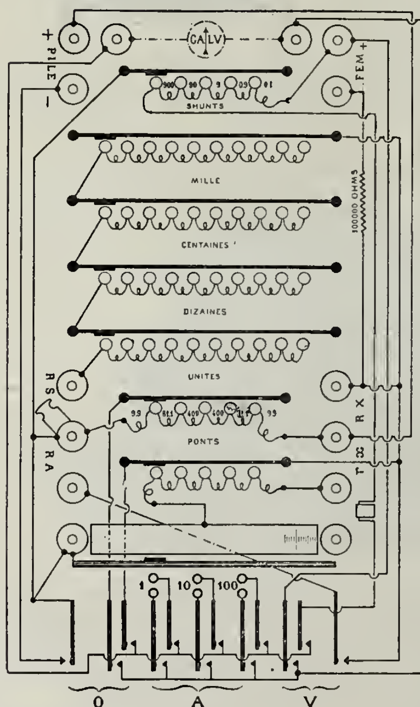



Fig. 245. — Schéma des connexions de la caisse universelle de mesure Chauvin et Arnoux.

Le pont de Wheatstone comprend quatre séries de résistances ayant respectivement 1, 10, 100 et 1 000 ohms, ce qui donne une résistance totale de 9 999 ohms. La branche de proportion à résistance totale constante est divisée en résistances partielles, de telle manière que le simple déplacement d'un curseur donne les rapports 100, 10, 1, 1/10 et 1/100, permettant ainsi d'effectuer des mesures de résistances comprises entre 0,01 et 1 ohm et entre 100 et 9 999 ohms. Cette branche de proportion est celle des deux ponts qui se trouve la plus rapprochée des séries de résistances en décades. La résistance à mesurer est reliée aux bornes RX.

Pour mesurer des résistances d'isolement, on emploie la méthode des comparaisons successives. A cet effet, une résistance de 100 000 ohms est montée en circuit dans la caisse. La pile, dont la force électromotrice doit être comprise entre 20 et 200 volts, se relie aux bornes + FEM — et les bornes RA sont reliées à l'aide d'une barrette en cuivre. On met le curseur des shunts sur le plot convenable pour réduire la sensibilité du galvano-

mètre dans la proportion voulue; ce shunt permet de faire varier la sensibilité dans les rapports 1, 1/10, 1/100, $1/10^3$, $1/10^4$, et comporte cinq bobines en série ayant une résistance totale de 1000 ohms et respectivement de 900; 90; 9; 0,9 et 0,1 ohm. Pour que ces shunts soient applicables à tous les galvanomètres, on leur adjoint, lors de la construction, une résistance de tarage.

Pour les mesures d'intensité de 0,0000001 à 0,3 ampère, on utilise les shunts du galvanomètre; suivant le shunt employé, chaque division de l'échelle correspond à 0,001; 0,0001; 0,00001; 0,000001 ou 0,0000001 ampère. Lorsque les intensités sont supérieures à 0,3 ampère, on se sert de l'un des trois shunts séparés qui sont logés dans le couvercle de la caisse.

Enfin, pour les mesures de tension, on les détermine également par la déviation directe du galvanomètre et, suivant la position donnée au curseur du shunt, chaque division correspond à 0,01; 0,1 ou 1 volt.

La figure 245 donne le schéma des connexions de cet instrument universel.

## APPAREILS ACCESSOIRES POUR INSTALLATIONS DE MESURE ÉLECTRIQUE

**Piles étalons.** — Les éléments de pile étalon exposés étaient peu nombreux.

L'Institut physico-technique Impérial de Charlottenbourg (Allemagne) avait exposé un élément étalon Latimer-Clark.

Cet élément (*fig.* 246) se compose d'un vase en verre placé dans une enveloppe métallique fermée par un couvercle en ébonite. Sur celui-ci sont fixées les bornes entre lesquelles se trouve la tige d'un thermomètre. L'électrode de platine amalgamé qui forme le pôle positif communique à une des bornes par un fil de platine scellé dans un tube de verre. Elle plonge dans une pâte de sulfate de mercure, de sulfate de zinc et de mercure contenue dans un vase poreux.

Une tige de zinc pur plonge dans des cristaux de sulfate de zinc recouverts par une solution saturée de ce produit. Le zinc est protégé par un tube de verre dans son passage au travers du liquide et ce dernier est recouvert de paraffine, puis de liège râpé et, enfin, de résine fondue. Cette disposition permet d'éliminer toute trace d'air et de permettre cependant, grâce au liège, à la dilatation de se produire.

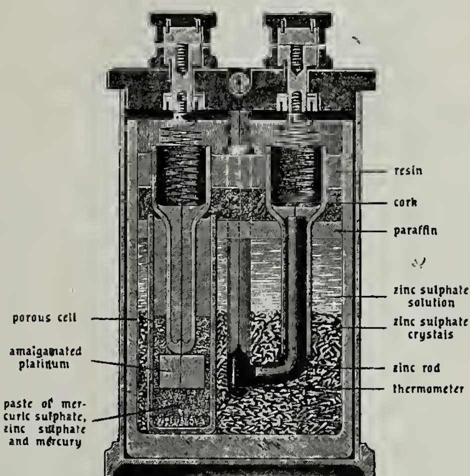



Fig. 246. — Pile étalon Latimer-Clark, modèle de l'Institut de Charlottenbourg.

Le principal avantage de ce montage est de rendre l'élément transportable sans que les secousses puissent faire varier sa force électromotrice. Puisque celle-ci est admise *a priori*, comme étant égale à 1,434 volt, on comprend combien il est important qu'on puisse compter sur cette valeur qui sert de point de départ pour toutes les mesures faites avec les potentiomètres.

L'Institut physico-technique avait également exposé un élément étalon Weston, aux sulfates de cadmium et de mercure, qui a, sur l'élément Latimer-Clark, l'avantage d'avoir une force électromotrice indépendante des variations ordinaires de la température. Cet élément a été particulièrement étudié par l'Institut de Charlottenbourg.

M. J. Carpentier avait exposé des éléments étalons Latimer-Clark, Gouy et Weston. A signaler également l'élément étalon Latimer-Clark construit par MM. Chauvin et Arnoux.

MM. Hartmann et Braun avaient également, dans leur exposition, des éléments étalons Latimer-Clark, Weston et lord Raleigh.

Enfin, dans la section anglaise, M. James White et MM. Crompton et Cie avaient envoyé quelques éléments étalons.

**Condensateurs étalons.** — Très peu de modèles de condensateurs figuraient à l'Exposition.

M. J. Carpentier exposait des condensateurs ordinaires à papier, des condensateurs de précision à mica et, enfin, des condensateurs avec mica argenté, l'argenture constituant les armatures, de sorte qu'il n'y a aucun corps étranger interposé; ce mode de construction évite les variations de capacité causées par le desserrage, le contact de l'armature avec le diélectrique étant assuré par construction.

MM. Keiser et Schmidt, de Berlin, avaient exposé des condensateurs dans lesquels le diélectrique est du papier chimiquement pur imprégné d'une matière isolante spéciale dont la composition n'a pas été communiquée. La charge résiduelle de ces condensateurs serait, paraît-il, presque aussi faible que celle des condensateurs à mica.

La Société Siemens et Halske, de Berlin, avait des condensateurs à mica et des condensateurs à papier.

**Étalons de self-induction.** — Deux constructeurs seulement avaient exposé des étalons de self-induction, M. J. Carpentier et la Société Ganz, de Budapest.

M. J. Carpentier avait exposé un étalon de self-induction de 1 henry ayant une constante de temps d'environ 0,01 seconde et des étalons de 0,1 henry.

L'étalon exposé par la Société Ganz est l'œuvre des professeurs Hoor et Fröhlich; c'est un travail de haute précision. Il se compose d'un tore en marbre à section rectangulaire, très exactement travaillé de manière à obtenir des dimensions géométriques parfaitement définies. Le bobinage se compose de deux fils de cuivre isolés à la soie et roulés très uniformément autour du tore en marbre. Les extrémités des deux bobines aboutissent à quatre bornes disposées sur le socle en ébonite. Le coefficient de self-induction se calcule en partant des dimensions géométriques et du nombre de spires. Quand les deux enroulements sont montés en série, on obtient un étalon dont le coefficient est de $0,0998.10^{-9}$ henry. Cet étalon se renfermé dans une boîte en chêne fermée par une glace.

**Clés diverses.** — Les clés de divers modèles exposées par MM. J. Carpentier, E. Ducretet, Hartmann et Braun, James White et la Société Siemens et Halske ne présentaient aucune disposition nouvelle. Toutefois, il faut constater le fini de leur exécution et les ingénieuses dispositions prises pour éviter les pertes de charge par les supports isolants des pièces métalliques. Dans ce but, certains constructeurs donnent aux colonnes d'ébonite une surface cannelée avec arêtes vives.

L'ébonite étant hygrométrique et s'altérant avec le temps, on a cherché à la remplacer par d'autres substances, mais sans grand succès, car le beau poli de l'ébonite ne s'obtient pas avec les substances essayées jusqu'ici.

**Suspensions pour galvanomètres.** — Des modèles de suspension antisecousses, du type Julius, étaient exposés par M. J. Carpentier et par MM. Hartmann et Braun.

L'appareil Julius, que représente la figure 247, permet de neutraliser complètement l'effet des vibrations étrangères sur les équipages mobiles des galvanomètres sensibles, tels que celui de lord Kelvin.

L'instrument qu'on veut soustraire aux trépidations est disposé sur un plan suspendu par trois points A', B', C', disposés en triangle équilatéral, à trois autres points A, B, C d'un support ou du plafond, également disposés en triangle équilatéral. On emploie pour la suspension trois longs fils métalliques.

D'après les études du professeur Julius, les forces qui agissent en A', B', C' produisent une perturbation beaucoup plus faible que celles qui agissent sur les points A, B, C. Pour réduire au

minimum l'effet perturbateur, il est nécessaire que le centre de gravité du système (galvanomètre et support) coïncide avec celui des points A′, B′, C′. Enfin, les trois longs fils de suspension doivent être aussi identiques que possible et être également tendus. Dans ces conditions, c'est le centre de gravité du système qui subit les moindres perturbations, les autres points étant d'autant plus influencés qu'ils sont plus éloignés de ce centre de gravité.

Comme c'est l'équipage mobile qui doit être le mieux protégé contre les influences extérieures, on s'arrange pour que le point d'attache supérieur de la fibre de quartz ou du fil de cocon qui supporte le miroir soit au centre de gravité du système. Pour obtenir ce résultat, le support est pourvu de masses supplémentaires que l'on peut déplacer à volonté pour faire varier la position du centre de gravité qui doit coïncider avec le point de suspension du miroir et le milieu du triangle ABC.

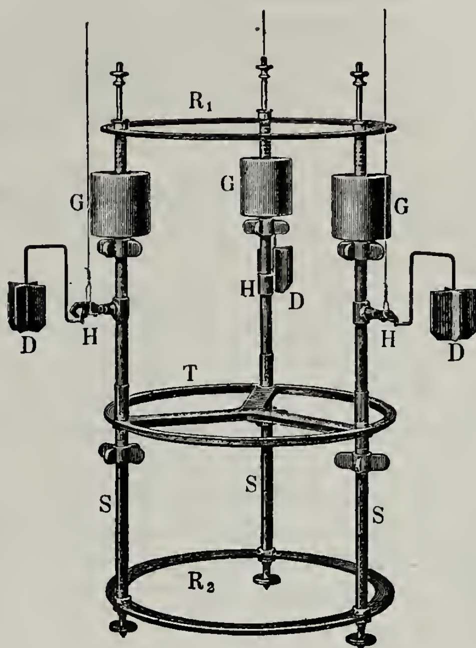


Fig. 247. — Suspension antisecousses, système Julius.

L'appareil est constitué par trois tiges verticales S, S, S, solidement reliées par les anneaux $R_1$, $R_2$ ; un second anneau T, dont la hauteur peut être réglée, sert à supporter le galvanomètre que l'on fixe à l'aide de pinces spéciales. Les trois crochets H, H, H servent à suspendre l'ensemble par les fils métalliques fixés, d'autre part, au plafond; ces crochets représentent les points A′, B′, C′, disposés en triangle équilatéral. Les trois masses G, G, G servent à déplacer le centre de gravité ; elles sont enfilées sur les tiges S, S, S, qui sont graduées de façon que les masses puissent être relevées ou abaissées de quantités égales. Enfin, les trois ailettes D, D, D plongent dans des godets pleins d'huile et constituent un amortisseur. Les godets sont placés sur un support spécial qui est indépendant du système et n'est pas représenté sur la figure.

Les fils de suspension doivent avoir une longueur de 2 à 3 mètres.

Pour installer un galvanomètre, on place l'appareil sur une table et l'on décroche les fils de suspension. Puis on fixe le galvanomètre sur l'anneau T, que l'on élève ou que l'on abaisse jusqu'à ce que le miroir de l'équipage mobile se trouve à la hauteur du plan horizontal HHH. On met l'ensemble de niveau en manœuvrant les vis calantes de l'anneau $R_2$ et, au besoin, celles du galvanomètre lui-même. Enfin, on règle la position des masses G, G, G. On accroche alors les trois fils de suspension en H, H, H, et on retire la table. Si l'horizontalité du système ne s'est pas maintenue, il suffit d'allonger ou de raccourcir deux des fils à leur point d'attache au plafond en agissant sur des vis de rappel disposées à cet effet.

**Échelles.** — M. J. Carpentier exposait plusieurs modèles de ses échelles transparentes avec lanterne pour bougie et avec lanterne pour lampe à incandescence.

Les échelles transparentes de M. E. Ducretet sont disposées pour recevoir, à leur partie supérieure, une lanterne à gaz ou une lanterne avec lampe à incandescence.

La Société Siemens et Halske avait exposé un support mural pour galvanomètre et échelle, consistant en une planchette verticale que l'on accroche au mur et qui est munie d'une console sur laquelle se place le galvanomètre. L'échelle, disposée au-dessous du galvanomètre et au-dessus de la caisse renfermant la lampe, est facilement accessible. Un système de glaces et de prismes à réflexion totale envoie la lumière de la lampe sur le miroir du galvanomètre, qui la réfléchit sur l'échelle, dont l'inclinaison se règle à volonté.

M. Olivetti, d'Ivrea (Italie), exposait deux modèles d'échelles transparentes avec lampe à incandescence.

MM. Hartmann et Braun avaient aussi dans leur exposition, indépendamment des échelles ordinaires, plusieurs modèles de supports de lunette mobiles sur chariot se fixant au mur ou au plafond; ces supports, déplaçables en tous sens, ont un mouvement micrométrique ou à main, à volonté; l'éclairage de l'échelle est assuré par une lampe à incandescence avec réflecteur.

Enfin, des modèles d'échelles étaient également exposés par MM. James White, de Glasgow, Crompton et Cie, de Londres, et Th. Edelmann, de Munich.

**Installation type de laboratoire de mesure électrique.** — M. J. Carpentier avait exposé une installation de laboratoire de mesure semblable à celle qui est réalisée dans son laboratoire d'étalonnement.

Cette installation comprend la table de l'opérateur, *sur laquelle aucun appareil n'est fixe*, sauf, dans certains cas, les échelles transparentes.

Des barres de cuivre, superposées horizontalement dans un plan vertical, règnent tout le long de la table et, au moyen de prises de contact à serrage rapide, servent à établir les connexions nécessaires entre les divers appareils, ainsi qu'à amener le courant provenant de batteries de piles ou d'accumulateurs.

Les galvanomètres sont placés à 1 m en avant de la table sur des supports indépendants en forme de trépied. Les fils de liaison des galvanomètres à la table sont fixés sous moulures en contournant le plancher de manière à éviter les fils volants et à permettre le passage entre la table et les galvanomètres.

---

# TABLE DES MATIÈRES

## I

### Galvanomètres

GALVANOMÈTRES A AIMANT MOBILE ET A BOBINE FIXE



GALVANOMÈTRES A AIMANT FIXE ET A BOBINE MOBILE



GALVANOMÈTRE THERMIQUE



GALVANOMÈTRE ÉLECTRO-CAPILLAIRE



## II

### Électrodynamomètres

ÉLECTRODYNAMOMÈTRES DE TORSION



ÉLECTRODYNAMOMÈTRES-BALANCES

## III

### Électromètres

ÉLECTROMÈTRE ABSOLU



ÉLECTROMÈTRES A GRADUATION EMPIRIQUE



## IV

### Ampèremètres et voltmètres

INSTRUMENTS ÉLECTRODYNAMIQUES



INSTRUMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES



INSTRUMENTS A INDUCTION



INSTRUMENTS THERMIQUES

VOLTMÈTRES ÉLECTROSTATIQUES



V

## Résistances et instruments pour la mesure des résistances

RÉSISTANCES



BOITES DE RÉSISTANCES ET PONTS



OHMMÈTRES



VI

## Potentiomètres



VII

## Wattmètres

WATTMÈTRE ÉLECTROSTATIQUE



WATTMÈTRES ÉLECTRODYNAMIQUES

V

**Instruments de mesure spéciaux pour les courants alternatifs**



IX

**Instruments de mesures magnétiques**



X

**Instruments divers et appareils accessoires pour installations de mesure électrique**



Tours. — Imprimerie Deslis Frères, rue Gambetta, 6.

# L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

E. HOSPITALIER
Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

J.-A. MONTPELLIER
Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION

*D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS*

14[e] FASCICULE

## COMPTEURS ÉLECTRIQUES

PAR

J.-A. MONTPELLIER et M. ALIAMET

PARIS
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49
TÉLÉPHONE 147-92

1902

# L'ÉLECTRICITÉ

A

# L'EXPOSITION DE 1900

QUATORZIÈME PARTIE

## COMPTEURS ÉLECTRIQUES

**Classification.** — Les compteurs électriques actuellement en usage peuvent être classés en trois groupes :

1° Les *compteurs de temps*, totalisant le nombre d'heures pendant lequel l'installation a utilisé le courant ;

2° Les *compteurs de quantité d'electricité*, intégrant l'intensité du courant fourni en fonction du temps, lorsque la distribution est effectuée à potentiel constant ;

3° Les *compteurs d'énergie électrique*, qui effectuent l'intégration du produit $UI$ et qui peuvent être à intégration continue ou à intégration discontinue.

I

## COMPTEURS DE TEMPS

**Compteurs Aubert.** — *M. Aubert, de Lausanne (Suisse)*, avait exposé plusieurs types de compteurs de temps :

1° Compteur type A pour courant continu avec électro-aimant intercalé dans le circuit ;

2° Compteur type B pour courant continu et courant alternatif avec électro-aimant intercalé dans le circuit ;

3° Compteur type C pour courant continu avec électro-aimant monté en dérivation sur le circuit ;

4° Compteur type D pour courant alternatif avec électro-aimant à noyaux feuilletés ;

5° Compteur spécial pour batteries d'accumulateurs.

Le compteur type A pour courant continu est des plus simples ; il se compose uniquement d'un mouvement d'horlogerie dont le déclenchement et l'enclenchement du rouage sont commandés par un électro-aimant que traverse le courant.

Ce mouvement d'horlogerie actionne un enregistreur-totalisateur dont les indications sont lues sur quatre cadrans affectés respectivement aux minutes, aux heures, aux dizaines et aux centaines d'heures.

L'instrument peut fonctionner pendant 500 heures sans être remonté.

Le mouvement d'horlogerie comporte un balancier à spiral, ce qui permet à l'instrument de fonctionner dans une position quelconque.

La figure 1 montre la disposition des principaux organes.

Dès que le circuit sur lequel est intercalé le compteur vient à être fermé, le courant circule dans l'enroulement d'un électro-aimant A ; par suite, le noyau fixe B s'aimante et attire le noyau mobile B′. Un levier coudé C, monté sur l'axe $c$ (*fig.* 1 et 2) et relié au noyau mobile B′ par l'intermédiaire de la bielle $c'$, se trouve alors relevé par suite du mouvement de descente de B′. En se relevant, le levier C déclenche le balancier à spiral H et le mouvement d'horlogerie se met en marche ; il ne s'arrête que lorsque le courant est interrompu, car, à ce moment, le noyau mobile B′, n'étant plus attiré par le noyau fixe B, s'abaisse sous l'action du ressort R qui se détend et entraîne dans son mouvement le levier coudé C qui enclenche de nouveau le balancier à spiral H. Un ressort $c^2$, fixé sur le levier coudé C, vient alors buter contre une goupille d'arrêt $h$ que porte le balancier ; ce dernier, en vertu de son inertie, soulève le ressort $c^2$ et permet à la goupille $h$ de passer, mais la retient lorsque le balancier revient en arrière, grâce à l'appui que lui donne à ce moment le bras du levier coudé C.

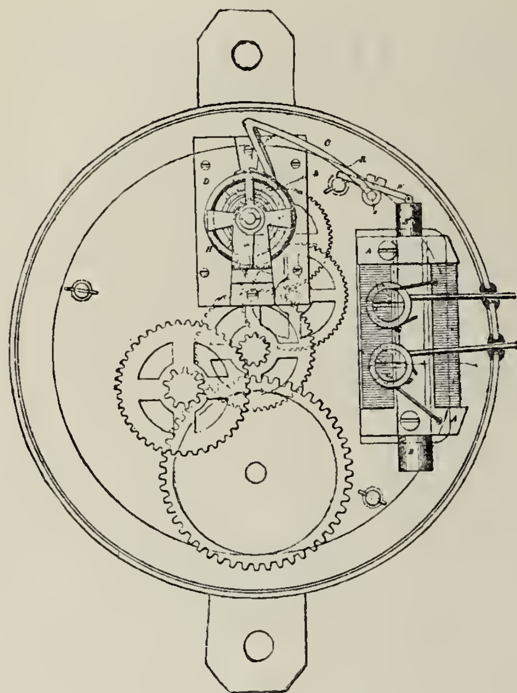


Fig. 1. — Détails du compteur Aubert.

Dès qu'un courant traverse de nouveau l'électro-aimant, le noyau B′ est attiré, le levier coudé C se soulève et le balancier repart aussitôt, le spiral étant toujours légèrement armé.

Les types courants de ce compteur sont établis pour des intensités de 0,1 à 0,5 ; de 0,2 à 1 ; de 0,3 à 2 ; de 0,5 à 3 ; de 0,8 à 5 ; de 1,5 à 10 ; de 4 à 20 et de 5 à 30 ampères.

L'instrument s'intercale sur l'un des conducteurs et son électro-aimant est, par conséquent, parcouru par le courant total.

Le compteur type B, pour courant continu et courant alternatif, est encore plus simple que le précédent. Il ne comporte, en effet, que le mouvement d'horlogerie avec balancier à spiral, dont le déclenchement ou l'enclenchement sont produits par la manœuvre d'un simple interrupteur de courant, monté sur la boîte de l'instrument.

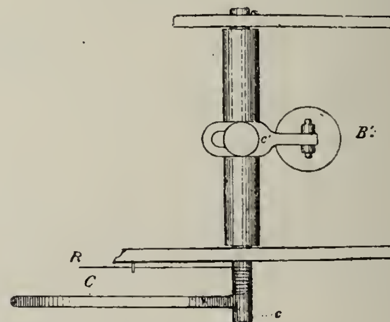



Fig. 2. — Détails du compteur Aubert.

Cet interrupteur, en même temps qu'il ferme le circuit, agit sur le balancier pour le déclencher et le mouvement d'horlogerie se met en marche ; au contraire, lorsque l'interrupteur est manœuvré pour ouvrir le circuit, il enclenche le balancier et le mouvement d'horlogerie s'arrête.

Ces compteurs s'intercalent sur l'un des conducteurs principaux du circuit et peuvent supporter de 0 à 20 ampères.

Le compteur type C pour courant continu est identique comme construction au type A ; il n'en diffère que par l'enroulement de l'électro-aimant, qui est, dans le cas actuel, en fil très fin et, par conséquent, présente une grande résistance électrique.

Dans ces conditions, l'électro-aimant est placé en dérivation sur les conducteurs de la canalisation de l'abonné et le compteur totalise le nombre d'heures et de minutes pendant lequel ces conducteurs ont été mis en charge.

Le débit peut alors être quelconque, puisque le courant principal ne traverse plus l'instrument.

La résistance électrique des bobines en fil fin de l'électro-aimant varie de 7 000 à 25 000 ohms, suivant que la tension pour laquelle ces bobines sont établies est comprise entre 50 et 300 volts.

La dépense horaire d'énergie électrique consommée par ce compteur pour son fonctionnement est insignifiante ; elle est d'environ 0,35 watt-heure.

Les compteurs type D pour courant alternatif sont identiques comme construction à ceux du type A, sauf en ce qui concerne l'électro-aimant, dont les noyaux fixe et mobile sont constitués par une série de tôles minces isolées l'une de l'autre.

Dans ce type de compteur, le courant principal traverse l'enroulement de l'électro-aimant; par conséquent, l'instrument ne peut être employé que pour des intensités déterminées. Il se construit, comme le type A, pour diverses intensités depuis 0,1 jusqu'à 30 ampères.

L'enroulement de l'électro-aimant ne comporte qu'un nombre de spires très réduit et son impédance est négligeable.

Le compteur Aubert pour batteries d'accumulateurs est utilisé pour enregistrer le nombre d'heures pendant lequel une batterie d'accumulateurs a fonctionné, afin de pouvoir arrêter à temps la décharge et de connaître approximativement la quantité d'énergie électrique à lui fournir pour la recharger complètement.

Les organes de ce compteur sont identiques à ceux du compteur type A, dont il ne diffère que par les dimensions plus grandes données au cadran, disposé pour que l'aiguille unique puisse totaliser, suivant les modèles, 24, 30, 36, 42, 48, 60 ou 100 heures pour un seul tour de l'aiguille.

Le courant principal traverse l'électro-aimant du compteur.

L'instrument est enfermé dans une solide boîte en fonte fermée par une lunette, munie d'une forte glace, à travers laquelle on peut lire les indications données par l'aiguille.

Employé principalement pour le contrôle des accumulateurs servant à l'éclairage des wagons de chemin de fer, on le fixe, dans ce cas, sous la caisse du véhicule à l'aide de pattes ou d'oreilles.

La lunette peut s'ouvrir au moyen d'une clé spéciale, afin de pouvoir remonter le mouvement d'horlogerie et remettre l'aiguille au zéro. Cette dernière opération doit se faire chaque fois que l'on remplace une batterie épuisée par une autre nouvellement chargée.

**Compteur Richard.** — Le compteur Richard (*fig.* 3) est une pendule électrique qui se met en marche dès que le courant passe dans l'instrument et qui s'arrête dès que le circuit est ouvert; il totalise la durée des périodes pendant lesquelles l'installation de l'abonné a utilisé le courant.

Cet instrument se remonte automatiquement toutes les 20 secondes.

Le mouvement d'horlogerie de la pendule servant à la mesure du temps se compose d'un mouvement ordinaire à balancier à spiral avec échappement à cylindre, mais ne possède pas de barillet moteur. Cet organe est remplacé par une roue à rochet C (*fig.* 4) qu'un ressort en boudin R tend à faire tourner, dans le sens indiqué par la flèche *f*, par l'intermédiaire du cliquet A, articulé en O‴ sur un levier LL'L″, affectant la forme d'un T. Un ressort *r* appuie constamment sur le cliquet A pour l'empêcher de s'échapper des dents du rochet C, lorsque le cliquet exerce sa poussée.

Ce système de remontage fonctionne de la manière suivante : le ressort R étant débandé, le rochet C s'arrêterait et, par suite, le mouvement d'horlogerie ne fonctionnerait plus ; mais, au moment où le ressort R est sur le point d'être détendu, la vis réglage V presse contre le levier vertical DO″ en surmontant l'effet du ressort *r″*. A ce moment, l'extrémité du levier O'D' n'étant plus soutenue, le levier obéit à l'action du ressort *r'*, bascule et vient fermer le circuit de l'électro-aimant E, le contact en argent *m* venant s'appuyer sur la goupille isolée G. L'électro-aimant

attire alors son armature B, solidaire du levier LL'; elle bascule aussitôt autour du point O et, dans ce mouvement, tend le ressort R ; en même temps, le cliquet A se relève et se met en prise avec une nouvelle dent du rochet C. Vers la fin de la course du levier LL', la vis V' vient rencontrer le grain $n$ placé à la partie inférieure du levier O'D' et fait remonter ce dernier jusqu'à ce que son extrémité D' remonte sur l'extrémité du levier vertical DO'', obéissant à l'action du ressort $r''$. Aussitôt le circuit de l'électro-aimant E est coupé et le ressort R fait agir le cliquet A sur la roue à rochet C.

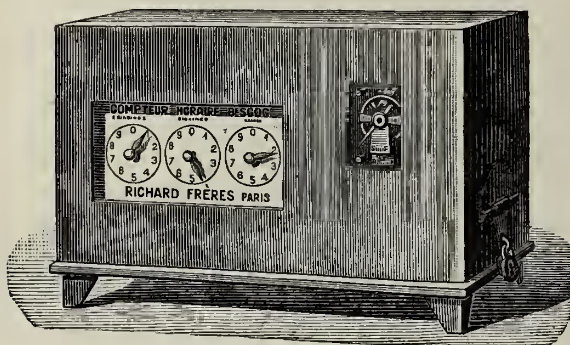



Fig. 3. — Compteur de temps Richard.

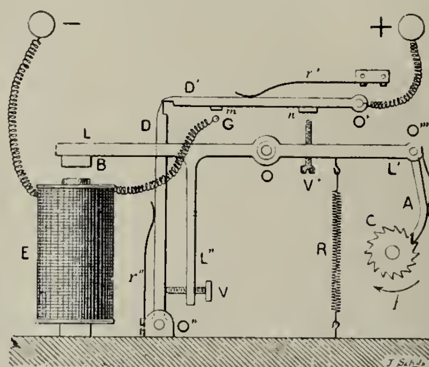



Fig. 4. — Mécanisme de remontage automatique du compteur Richard.

Ces mouvements de remontage sont très rapides et durent à peine une fraction de seconde.

L'électro-aimant E a été établi pour ne fonctionner qu'avec une différence de potentiel donnée, c'est-à-dire avec la tension normale de la distribution. Il s'ensuit que, lorsque la tension est inférieure à la tension normale, le remontage ne se fait plus.

Le totalisateur de l'instrument comporte généralement trois cadrans, affectés respectivement aux unités, aux dizaines et aux centaines d'heures. Il présente cette particularité que les aiguilles indicatrices tournent toutes dans le même sens, de gauche à droite. Dans les totalisateurs ordinaires, les aiguilles tournent alternativement dans chaque sens d'un cadran à l'autre; dans le compteur Richard, on a obtenu le même sens de rotation à l'aide de pignons intermédiaires qui changent le sens de rotation ordinaire sans changer la vitesse relative.

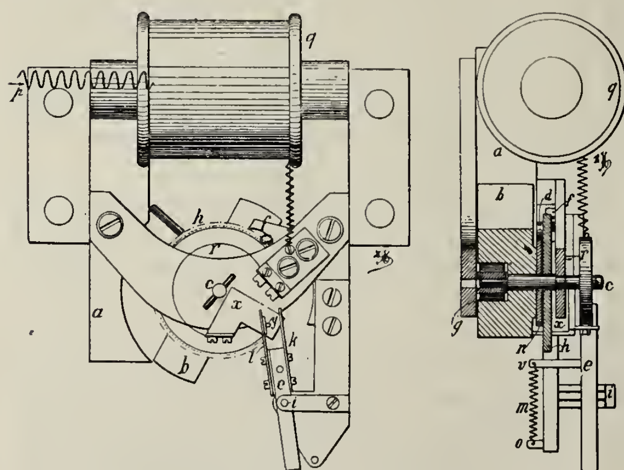



Fig. 5. — Compteur horaire Aron.

**Compteur Aron.** — Cet instrument, exposé par la *Société des compteurs Aron, de Charlottenburg*, comporte un système de remontage électro-automatique (*fig.* 5), composé d'un électro-aimant $aq$ et d'une armature $b$, solidaire d'un axe $c$, traversé par une goupille. C'est cet axe qui attaque le mobile à moindre vitesse angulaire du mouvement d'horlogerie.

Ce mouvement ne présente rien de particulier et la description détaillée du dispositif de remontage électro-automatique sera donnée plus loin à propos du compteur d'énergie électrique du même inventeur.

Le compteur horaire se monte en dérivation sur la canalisation. Il se construit pour courant continu et pour courant alternatif.

**Compteur Siemens et Halske.** — Ce compteur, exposé par la *Société Siemens et Halske, de Berlin*, est, comme le précédent, à remontage électro-automatique. Le mouvement d'horlogerie comporte un échappement à ancre.

L'enroulement de la bobine de l'électro-aimant de remontage est calculé pour pouvoir supporter sans inconvénient une variation de ± 15 0/0 de la tension normale du réseau de distribution. Cet électro-aimant se monte en dérivation sur la canalisation. On peut, suivant son enroulement, l'utiliser avec du courant continu ou avec du courant alternatif.

**Compteur Hartmann et Braun.** — Le compteur horaire de MM. *Hartmann et Braun, de Francfort*, est constitué par un mouvement d'horlogerie remonté électriquement et à échappement à ancre, ce qui permet à l'instrument de fonctionner dans toutes les positions et d'être complètement insensible aux secousses.

L'électro-aimant de remontage a ses bobines montées en dérivation sur les conducteurs de la canalisation. Ce circuit dérivé est interrompu à volonté à l'aide d'un commutateur solidaire du rouage de minuterie. Lorsque le ressort de remontage est débandé, le commutateur ferme automatiquement le circuit et l'armature de l'électro-aimant est brusquement attirée. Le ressort une fois remonté, le circuit dérivé est coupé et le rouage défile proportionnellement au temps jusqu'à ce que le ressort, ayant besoin d'un nouveau remontage, soit de nouveau remonté automatiquement.

Tout le temps que le circuit d'utilisation reste en charge, le compteur fonctionne et enregistre la durée de cette mise en charge.

Le compteur horaire pour courant alternatif ne diffère du compteur pour courant continu que par l'enroulement des bobines et par le noyau de l'électro-aimant, qui est en tôles isolées.

---

II

## COMPTEUR DE QUANTITÉ

**Compteur O'Keenan.** — Ce compteur, connu sous le nom de compteur O'K, est construit par la *Compagnie pour la fabrication des compteurs et matériel d'usines à gaz*, qui l'avait exposé.

Cet instrument est fondé sur les deux principes suivants :

1° Dans une machine magnéto-électrique, la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse angulaire ;

2° Le rendement d'un moteur magnéto-électrique est maximum lorsque le travail produit est nul ; la vitesse angulaire de l'induit est alors proportionnelle à la différence de potentiel appliquée aux balais.

Dans ces conditions, le nombre de tours est donc rigoureusement proportionnel au produit de la différence de potentiel aux balais par le temps.

Le compteur O'K est constitué par une machine magnéto-électrique fonctionnant en réceptrice. Le travail qui lui est demandé consiste uniquement à vaincre les frottements des pivots et à entraîner les rouages d'un totalisateur. Grâce à une construction très soignée, ce travail est assez faible pour que le rendement du moteur atteigne 0,99.

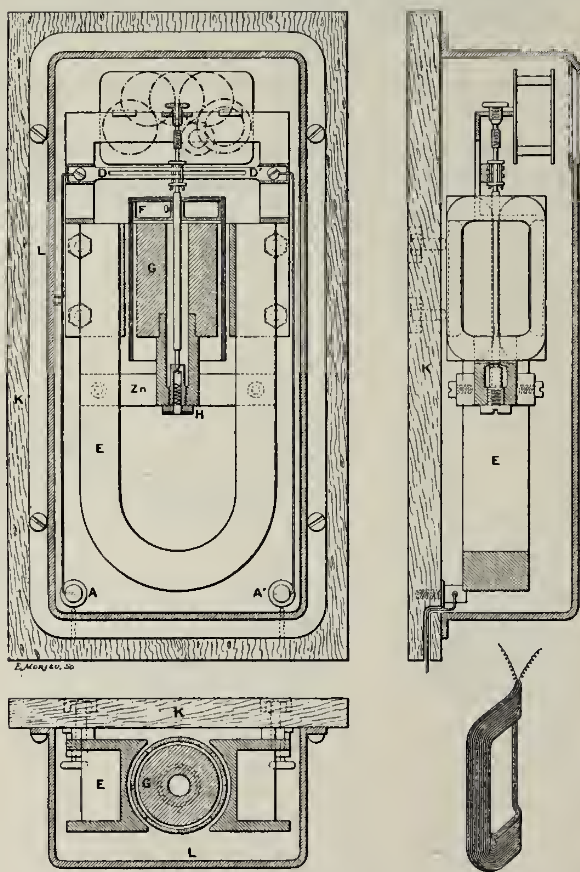


Fig. 6. — Détails de construction du compteur O'K.

La figure 6 montre les détails de construction de ce compteur, dont la figure 7 représente l'aspect extérieur.

L'induit F du moteur magnéto-électrique est constitué par une cloche (*fig.* 6) en matière isolante, montée sur un axe vertical reposant par son extrémité inférieure dans une crapaudine en saphir, et maintenu, à sa partie supérieure, par un palier. Sur cette cloche sont fixées six bobines, affectant la forme d'une galette ; ces bobines sont reliées entre elles et avec un collecteur à six segments, comme le sont les sections de l'induit Siemens en tambour. Cet induit est logé dans l'étroit entrefer ménagé entre les pièces polaires d'un aimant permanent E et un noyau de fer doux G maintenu en H. Aucune des pièces de fer n'étant mobile, il n'y a pas à craindre de pertes par hystérésis pendant la rotation de l'induit.

Le courant est amené au collecteur par de petits balais en argent DD′ ; les segments du collecteur sont également en argent.

Les balais sont reliés respectivement avec les bornes AA′.

Le totalisateur ne présente rien de particulier.

En appliquant aux balais une différence de potentiel de 0,5 volt, l'induit de ce compteur tourne à une vitesse angulaire de deux tours par seconde. La dépense de fonctionnement du moteur est comprise entre 0,0002 et 0,0004 ampère environ.

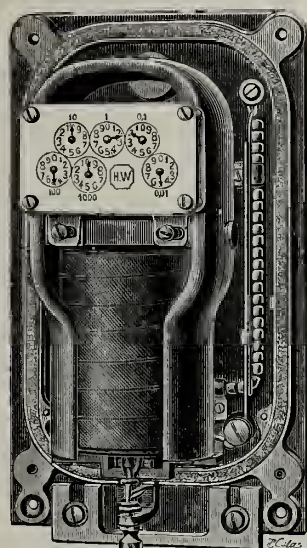



Fig. 7. — Compteur O'K.

L'instrument se monte comme l'indique la figure 8. Le courant traverse un shunt étalonné $\rho$ et produit entre ses extrémités une chute de tension qui agit sur l'induit du compteur.

Ce compteur peut également être utilisé comme volt-heuremètre sur les canalisations de distribution à intensité constante.

Pour enregistrer la charge et la décharge des accumulateurs, le compteur O'K comporte un shunt étalonné divisé en deux parties R et R′. Le courant de charge ne traverse que la résistance R, tandis que le courant de décharge passe dans les deux R + R′. Si le rapport

$$\frac{R}{R + R'}$$

est égal au rendement admis pour la batterie d'accumulateurs, le compteur indiquera les ampères-heure fournis, puis ceux utilisés et reviendra au zéro à la fin de la décharge, puisque le sens de rotation de l'induit se modifie suivant le sens du courant dans le shunt.

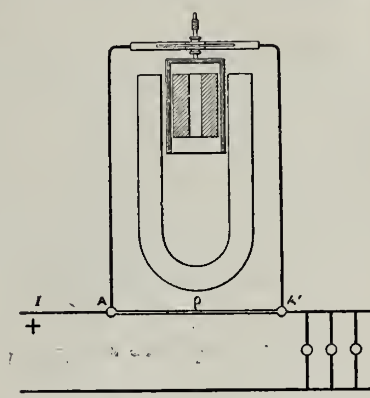



Fig. 8. — Montage du compteur O'K.

Bien que l'induit du compteur O'K soit bobiné avec du fil de cuivre, ses indications sont indépendantes des variations de température. Cela tient à ce que la force contre-électromotrice d'un moteur magnéto-électrique ne dépend que du flux embrassé par l'induit, du nombre de spires de ce dernier et de la vitesse angulaire ; elle est indépendante de la résistance de l'induit.

III

# COMPTEURS D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

**Classification.** — Les compteurs d'énergie électrique sont aujourd'hui les plus nombreux. On sait que l'énergie dépensée dans un circuit est le produit de la puissance par le temps ou, plus exactement, l'intégrale du produit de la puissance par l'élément de temps. Le vattmètre étant l'instrument qui sert à mesurer la puissance, tout compteur d'énergie sera un vattmètre intégrateur. Il existe plusieurs procédés pour arriver à effectuer cette intégration et c'est la mise en pratique de divers procédés qui constitue les différences existant entre les compteurs qui vont être décrits et que l'on peut ranger, par suite, en trois catégories :

1° Les compteurs-moteurs ;

2° Les compteurs oscillants ;

2° Les compteurs à intégration discontinue.

## COMPTEURS-MOTEURS

**Principe.** — Dans une communication faite à la Société internationale des Electriciens, M. Paul Janet expose comme suit le principe de ces instruments :

« Dans un vattmètre ordinaire, le couple qui s'exerce entre les deux systèmes de bobines est équilibré par un couple de torsion proportionnel à l'angle de torsion ; mais, si l'on cesse de s'opposer à ce couple, la bobine mobile ou l'organe analogue prendra un mouvement de rotation que, moyennant certains artifices (collecteur, etc.), on pourra rendre continu. Si alors on oppose à ce couple moteur un couple résistant proportionnel à la vitesse, l'organe mobile prendra une vitesse proportionnelle au couple moteur, c'est-à-dire, en somme, à la puissance à mesurer. Le chemin parcouru par l'organe mobile (ou l'intégrale de la vitesse par rapport au temps) est alors proportionnel à l'énergie ; ce chemin parcouru peut se traduire par le mouvement d'une ou de plusieurs aiguilles sur des cadrans divisés. Le couple résistant proportionnel à la vitesse s'obtient aisément grâce à l'emploi des courants de Foucault induits dans un disque tournant par un champ magnétique constant. C'est là le principe des compteurs-moteurs ou compteurs à intégration continue. Les uns s'appliquent ou peuvent, en principe, s'appliquer indifféremment au courant continu ou alternatif : ce sont ceux qui reposent sur le principe du vattmètre électrodynamique. Les autres s'appliquent uniquement au courant alternatif : ce sont ceux qui sont fondés sur l'entraînement d'une masse métallique par un champ tournant ou, plus exactement, sur la réaction de deux champs présentant une différence de phase (principe de Ferraris) et appelés *compteurs d'induction*.

« Dans ces divers instruments, la force motrice qui met en marche le compteur est précisément proportionnelle à la puissance à mesurer et, pour que l'instrument donne des indications exactes, il faut que le couple résistant soit proportionnel à la vitesse. Les couples supplémentaires dus aux frottements mécaniques, quoique toujours assez faibles, prennent une certaine importance aux faibles charges et entraînent quelques erreurs que l'on peut approximativement corriger par certains artifices, tels que le compoundage. »

**Compteurs-moteurs fondés sur le principe du vattmètre électrodynamique.** — Les compteurs-moteurs de cette catégorie qui figuraient à l'Exposition étaient les suivants : compteur Thomson, compteur de la Société Luxsche Industriewerke, compteur Vulcain, compteur Peloux, compteur Schuckert et compteur Perdrisat.

*Compteur Thomson.* — Le compteur Thomson est construit en France par la *Compagnie pour la fabrication des compteurs et matériel d'usines à gaz.*

Cet instrument (*fig.* 9) comporte les organes suivants, fixés sur un arbre vertical monté sur pivots :

1° L'induit M (*fig.* 10) d'un petit moteur électrique ;

2° Un disque en aluminium D pouvant tourner entre les pôles d'aimants permanents AA et constituant un amortisseur qui absorbe le travail produit par le moteur électrique ; les aimants AA peuvent être déplacés facilement afin de modifier la valeur du couple de freinage, lors du réglage du compteur.

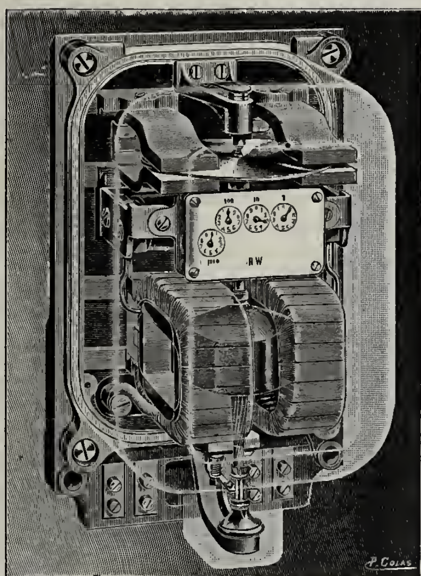


Fig. 9. — Compteur E. Thomson.

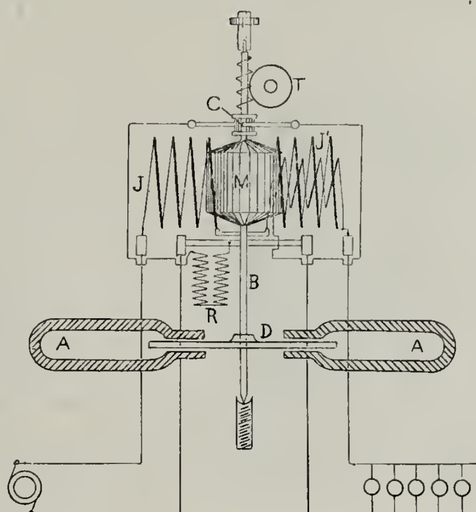



Fig. 10. — Schéma des connexions du compteur E. Thomson de 5 ampères.

Le moteur électrique ne comporte pas de fer dans sa construction. L'inducteur est constitué par deux bobines JJ' en gros fil, lames ou barres de cuivre, suivant la puissance du compteur ; ces bobines font partie d'un même circuit et sont parcourues par le courant à mesurer. L'induit M, monté en dérivation sur le circuit de distribution, se compose d'une carcasse formée de deux flasques polygonales en matière isolante, fixées sur l'axe, et d'un enroulement en tambour formé de huit bobines ou sections en fil fin isolé à la soie et à la gomme laque. Les extrémités de ces bobines aboutissent à un petit collecteur en argent, C, sur lequel appuient deux balais très élastiques en cuivre rouge. Ces balais sont mobiles autour de l'axe passant par leur centre d'inertie, de façon à les rendre moins sensibles aux vibrations ; le contact se fait par les bords de petits étriers très mobiles, de façon à avoir deux points de contact certains par balai.

Une résistance assez grande R est intercalée dans le circuit dérivé de l'induit. Cette résistance a pour effet de diminuer la différence de potentiel entre les deux balais afin d'éviter la production d'étincelles, quoique l'absence de fer dans le moteur rende cette production d'étincelles à peu près impossible. Cette résistance est suffisamment grande pour que l'on puisse admettre que l'intensité du courant traversant l'induit est proportionnelle à la différence de potentiel qui doit entrer comme facteur dans le produit *UI*.

Dans ces conditions, le couple moteur du système sera, à chaque instant, proportionnel au

produit $UI$, c'est-à-dire à la puissance, et ce produit, multiplié par la vitesse, donnera à chaque instant la quantité d'énergie utilisée.

Le travail du moteur est absorbé par l'amortisseur D; or, le travail ainsi absorbé, par suite de la production de courants de Foucault dans le disque d'aluminium, étant fonction de ces courants multipliés par la vitesse angulaire $\omega$, et ces courants étant eux-mêmes proportionnels à la vitesse, ce travail sera proportionnel au carré de la vitesse :

$$UI\omega = k\omega^2,$$

d'où l'on tire

$$UI = k\omega,$$

expression dans laquelle $k$ est une constante à déterminer et $\omega$ la vitesse angulaire. Donc, à chaque instant, la vitesse du système sera proportionnelle à la puissance à mesurer.

Le mécanisme totalisateur est un simple compteur de tours actionné par une vis sans fin placée à la partie supérieure de l'arbre vertical portant l'induit du moteur.

Dans ce genre de compteurs, la principale cause d'erreur, surtout à faible charge, est due aux frottements. Dans le compteur Thomson, on a cherché à réduire les frottements au minimum par une bonne construction mécanique. L'extrémité inférieure de l'arbre vertical repose dans une crapaudine garnie de saphir poli; en outre, l'instrument est disposé pour que la vitesse soit toujours très faible, même à pleine charge. Malgré ces dispositions, les frottements au départ fausseraient les indications lorsque la charge est faible; on compense approximativement cette résistance mécanique en munissant les inducteurs d'un enroulement supplémentaire en fil fin monté en dérivation sur la canalisation; on obtient ainsi un couple additionnel proportionnel au carré de la tension et qu'on peut rendre égal au couple initial de frottement. Toutefois, le couple de frottement dépendant de la vitesse et le couple supplémentaire n'en dépendant pas, la compensation ne peut se produire pour une vitesse quelconque, ce qui, du reste, ne présente pas une grande importance, la correction n'étant nécessaire que pour les faibles charges. On peut craindre que, si l'enroulement supplémentaire est calculé de manière à équilibrer exactement la résistance de frottement au départ, le compteur ne marche à vide lorsqu'il est soumis à des vibrations où à des trépidations ; afin d'éviter ce grave inconvénient, on se tient au-dessous d'une compensation complète et l'on protège l'instrument contre les vibrations à l'aide d'une suspension élastique appropriée.

En ce qui concerne l'action des variations de température, leur influence sur l'exactitude des indications fournies par le compteur a été prévenue et évitée en employant des alliages acier-nickel de M. Guillaume qui peuvent avoir, suivant leur composition, des coefficients de température quelconques : positifs, négatifs ou nuls.

Si les bobines et le disque amortisseur sont en cuivre, il y a compensation, à la condition que la température de ces organes soit la même. L'échauffement produit dans les bobines par le passage du courant empêche, dans la pratique, cette compensation de se produire. C'est pour cette raison que les disques amortisseurs sont maintenant en aluminium.

La consommation à vide des compteurs Thomson ne dépasse pas 2 ou 3 watts et le démarrage a lieu à moins de 1 0/0 de la charge maximum.

La Compagnie pour la fabrication des compteurs avait exposé de nombreux types de ces compteurs depuis 2 ampères jusqu'à 10 000 ampères pour circuits de distribution à courant continu à 2, 3 et 5 fils.

Tous ces instruments sont à lecture directe en hectowatts-heure pour les modèles de faible et de moyenne puissance. Quant à ceux de grande puissance, les lectures doivent être multipliées par une constante marquée sur l'instrument et généralement égale à 2, 3, 4, etc.

Les compteurs Thomson peuvent être également utilisés sur les circuits à courant alternatif; mais, dans ce cas, ils comportent la même cause d'erreur que le wattmètre ordinaire, erreur qui vient à deux causes distinctes :

1° La self-induction de la bobine en fil fin qui réduit l'intensité du courant dans cette bobine

(pour une même tension aux bornes), dans le rapport de $\cos \varepsilon$ (retard de l'intensité sur la tension) à 1 ;

2° Le retard de l'intensité du courant sur la tension dans cette même bobine réduit à $\varphi - \varepsilon$ le décalage entre l'intensité dans la bobine en gros fil et l'intensité dans la bobine en fil fin, ce qui augmente le couple dans le rapport de $\cos(\varphi - \varepsilon)$ à $\cos \varphi$.

Pour supprimer cette dernière cause d'erreur, M. Frager a employé l'artifice suivant : Au lieu de chercher à supprimer le décalage $\varepsilon$, on cherche à retarder également de $\varepsilon$ le champ principal ; le décalage entre le courant dans la bobine en fil fin (courant de tension) et le champ inducteur est alors $\varphi - \varepsilon + \varepsilon = \varphi$ et la deuxième cause d'erreur disparaît. Pour obtenir ce résultat, on place à l'intérieur de la bobine principale une seule spire d'un fil peu résistant fermé sur lui-même. Des courants sont induits dans cette spire et le champ résultant est, à un facteur constant près, égal à la somme géométrique des ampères-tours principaux et des ampères-tours de la spire additionnelle.

*Compteur de la Société Luxsche Industriewerke.* — Ce compteur (*fig.* 11), construit et exposé par la *Luxsche Industriewerke A. G., de Munich*, est fondé sur le même principe que le compteur Thomson dont il ne diffère que par l'enroulement de l'induit du moteur.

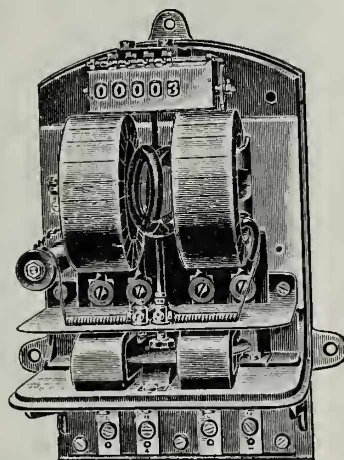


Fig. 11. — Compteur de la Société « Luxsche Industriewerke ».

Au lieu de l'induit en tambour, employé dans le compteur Thomson cette Société utilise un induit à enroulement ouvert, composé de trois bobines plates égales, dont les axes, perpendiculaires à l'axe de rotation, font entre eux des angles de 120° ; l'une des extrémités de chacune de ces bobines aboutit à un même point neutre et les trois extrémités libres sont reliées respectivement aux trois lamelles d'un collecteur sur lequel appuient deux balais. Ce sont là les dispositions essentielles de l'induit de la dynamo Thomson-Houston à intensité constante, employée jadis pour l'éclairage par lampes à arc en série. Le principal avantage de ce type d'induit sur les induits à enroulement fermé est de donner, pour un même poids de cuivre, un plus grand couple moteur ou, pour un même couple moteur, une plus grande légèreté de l'induit. Dans les induits en tambour à enroulement fermé, chaque enroulement n'est traversé que par la moitié du courant, tandis que, dans l'induit à enroulement ouvert, la totalité du courant passe dans les bobines ; dans ces conditions, le couple est augmenté dans le rapport de 1 à 1,7 ou, à égalité de couple, on peut diminuer le poids du cuivre dans le même rapport. On obtient ainsi des induits très légers qui permettent de diminuer beaucoup les frottements ; en outre, le collecteur, n'ayant que trois lamelles, peut être de très petit diamètre, ce qui réduit au minimum le frottement des balais.

La consommation de ces compteurs pour leur fonctionnement ne dépasse pas 2,5 watts. Ils démarrent à moins de 2 0/0 de la charge maximum.

La minuterie ne comporte pas de cadrans à aiguilles ; elle présente des disques à *chiffres sauteurs*, ce qui rend la lecture plus facile et plus exacte.

Ce compteur se construit pour tous les systèmes de distribution et s'applique aussi bien au courant alternatif qu'au courant continu.

*Compteur Vulcain.* — Le compteur Vulcain, construit et exposé par la *Compagnie anonyme continentale pour la fabrication des compteurs à gaz et autres appareils*, est du même système que le compteur Thomson, dont il ne diffère que par des modifications de détail (*fig.* 12).

L'inducteur du moteur, traversé par le courant à mesurer, ne présente rien de particulier. L'induit, monté en dérivation sur le circuit, est bobiné en fil très fin sur une carcasse en ébonite évidée et très légère. Cette carcasse est fixée sur un petit arbre vertical en acier dont les

pointes, formant pivots, reposent sur des crapaudines en saphir. Une résistance additionnelle est montée en série avec l'induit et la résistance totale du circuit dérivé atteint 5 000 ohms.

Les crapaudines, soutenues par des ressorts en boudin logés dans des tubes F, T (*fig.* 13), constituent une suspension élastique, évitant aussi bien le jeu qu'un serrage excessif sur les pointes de l'arbre. Le ressort en boudin placé dans le tube inférieur F équilibre le poids de toute la partie mobile comprenant l'induit et le cylindre C en cuivre rouge du frein électro-magnétique constituant l'amortisseur.

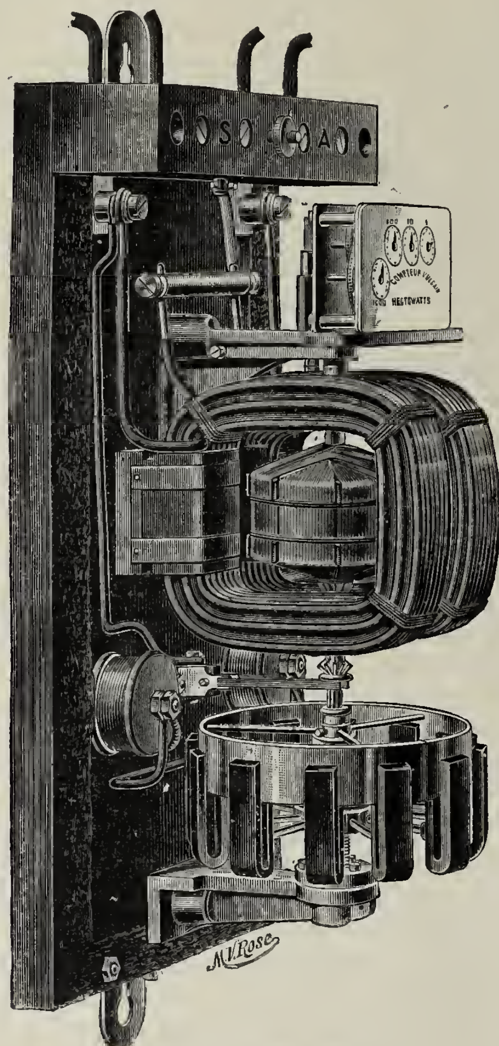



Fig. 12. — Compteur Vulcain.

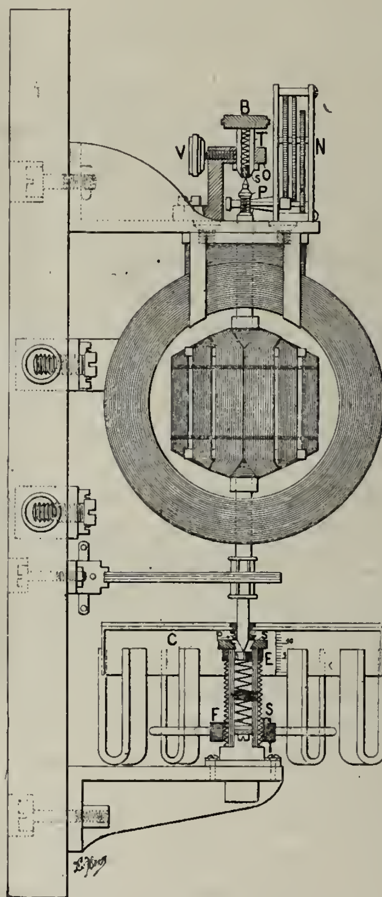



Fig. 13. — Détails de construction du compteur Vulcain.

Pour le frein, la forme cylindrique est préférable à celle d'un disque; car, à freinage électro-magnétique égal, la pièce est plus légère et toute la partie métallique de ce cylindre possède la même vitesse tangentielle. Avec les freins en forme de disque, les bords ont une vitesse supérieure à celle des parties médianes, condition d'autant moins favorable que la réaction des courants de Foucault agit inégalement sur les pôles des aimants.

Les aimants en forme d'U sont courts et nombreux, tout en ayant une section transversale relativement grande, disposition qui favorise le maintien d'une somme constante des flux élémentaires. Comme on le voit sur la figure 13, tous les aimants sont fixés sur un même support muni d'un écrou S que l'on peut faire monter ou descendre progressivement sur un tube F fileté extérieurement. Grâce à ce dispositif, on peut faire varier la pénétration du

cylindre de cuivre dans les champs magnétiques des aimants et, par suite, le couple de freinage lors du réglage de l'instrument. Une graduation E, tracée sur le cylindre C, sert de repère et permet de modifier, d'une manière très précise, la quantité dont on veut changer la pénétration du cylindre à 1/20 de millimètre près. Ce réglage une fois effectué, on immobilise d'un seul coup tous les aimants en serrant la vis de blocage 1 qui fixe l'écrou S.

L'arbre portant l'induit du moteur est muni, à sa partie supérieure, d'une vis sans fin qui attaque le premier mobile du totalisateur N, dont le pignon de commande a, pour chaque compteur, un nombre de dents tel que la constante de l'instrument soit égale à l'unité.

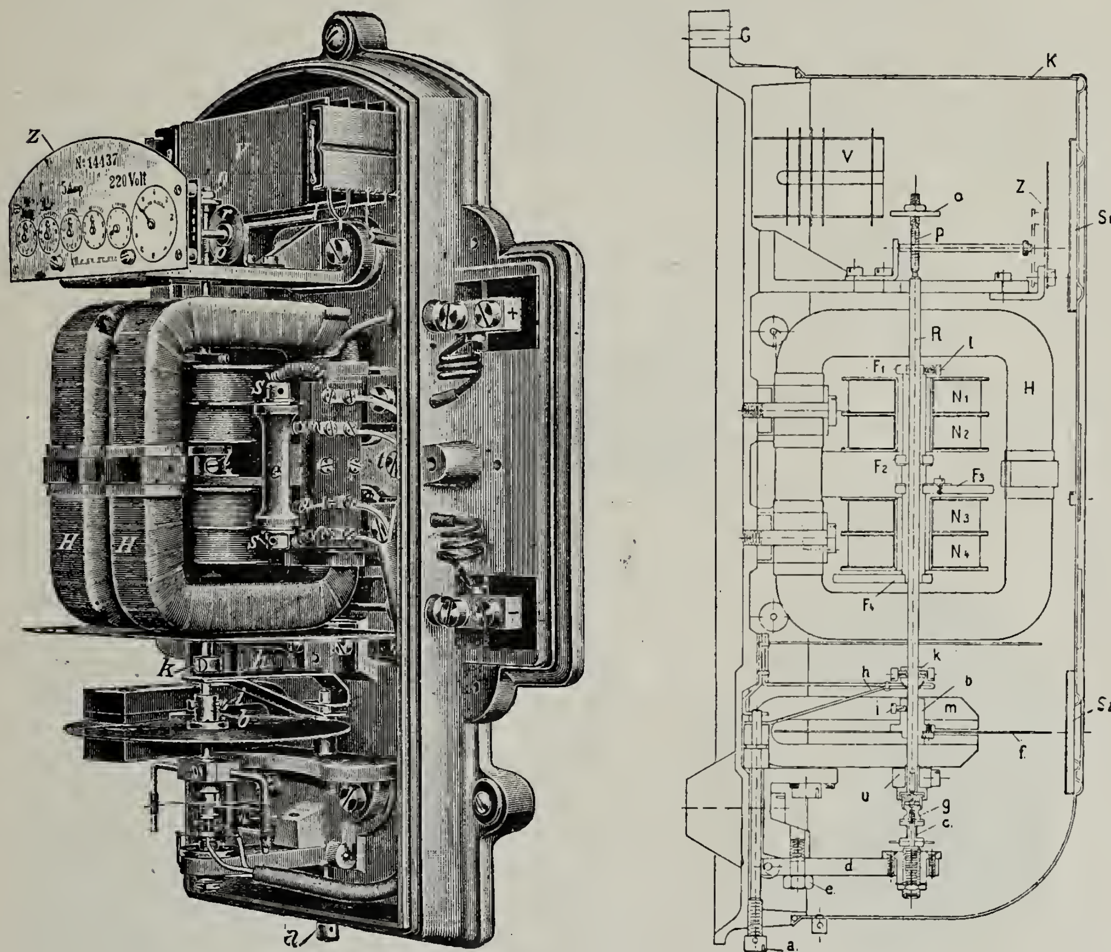



FIG. 14. — Compteur Peloux.

Grâce aux soins apportés à sa construction et aux divers dispositifs ingénieux utilisés pour réduire au minimum l'effet des résistances passives, un compteur, construit pour mesurer un courant de 200 ampères au maximum sous 110 volts, démarre franchement avec un courant de 0,23 ampère.

*Compteur Peloux.* — Ce compteur, exposé à la fois par la *Société Perdrisat, Blanc et Cie, de Territet (Suisse)*, et par la *Société Siemens et Halske, de Berlin*, est caractérisé par ce fait que toutes les bobines sont fixes et que la partie mobile est constituée uniquement par une armature en fer.

Dans ce compteur (*fig.* 14), le système moteur comprend deux bobines fixes H, H, parcourues par le courant dont on veut mesurer l'énergie, et par quatre bobines $N_1$, $N_2$, $N_3$, $N_4$, également fixes, de grande résistance (environ 3 000 ohms) et traversées alternativement par un courant dérivé.

Les bobines inductrices H, H ont à peu près la même forme que celles des compteurs déjà décrits ; elles sont reliées, d'une part, aux bornes $A_1$, $A_2$ (*fig.* 15) où aboutissent les conducteurs du réseau de distribution et, d'autre part, aux bornes $B_1$, $B_2$ où se fixent les conducteurs principaux du circuit d'utilisation.

Les bobines de dérivation $N_1$, $N_2$, $N_3$, $N_4$ forment deux groupes superposés; leurs axes sont verticaux et elles sont placées à l'intérieur des bobines H, H. Une résistance V est montée en série avec les bobines de dérivation. Au centre de ces dernières bobines est disposé un axe vertical mobile R, en fer, portant deux pièces de fer $F_1$, $F_2$ et $F_3$, $F_4$ (*fig.* 14), affectant la forme d'un Z et disposés à angle droit l'une par rapport à l'autre. L'axe mobile repose par son extrémité inférieure dans une crapaudine garnie de saphir ; l'extrémité supérieure, maintenue par un palier *o*, porte une vis sans fin P, qui entraîne la minuterie du compteur. L'axe mobile porte, en outre, le porte-balai *u* ; les deux balais, dans leur mouvement de rotation, appuient, l'un sur une bague en argent *g*, l'autre sur un commutateur à quatre segments *c*. La bague et le commutateur sont fixés sur le support *d* de la crapaudine.

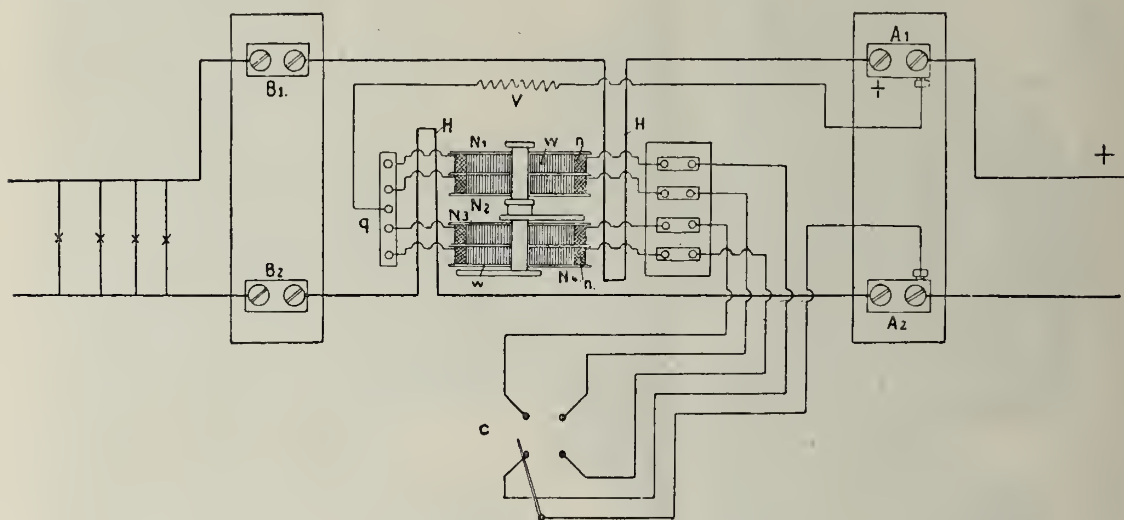



Fig. 15. — Schéma des connexions du compteur Peloux.

Le fonctionnement de ce compteur est le suivant : le courant de la canalisation, traversant les bobines inductrices H, H, produit un champ magnétique dans lequel sont placées les bobines induites $N_1$, $N_2$, $N_3$ et $N_4$, ainsi que leurs armatures $F_1$, $F_2$ et $F_3$, $F_4$. Une des extrémités de chacune de ces bobines induites est reliée à une borne commune *q* (*fig.* 15) et de là à la borne $A_1$ du compteur, par l'intermédiaire de la résistance V ; les extrémités opposées sont respectivement reliées à chacune des sections du commutateur qui les met successivement en communication, par l'intermédiaire des balais, avec la borne $A_2$.

Lorsque le courant dérivé traverse la bobine $N_1$, par exemple, la pièce de fer $F_1F_2$ s'aimante, créant un pôle nord à sa partie supérieure $F_2$ et un pôle de nom contraire à sa partie inférieure $F_1$ (*fig.* 16) ; le commutateur et le balai sont disposés de telle façon que la pièce de fer reste aimantée pendant tout le temps qu'elle se déplace pour parcourir un angle de 90°. Le champ magnétique, résultant du passage du courant dans les bobines inductrices H, H, agit sur la pièce de fer pour l'amener dans la direction du flux ; mais, au moment où cette pièce de fer arrive dans la position *xx*, le courant est interrompu dans la bobine $N_1$. Il en résulte un mouvement de rotation de la partie mobile qui aura passé de la position *yy* à la position *xx*, en décrivant un quart de tour. A ce moment, le courant, par le jeu du commutateur, passe dans la bobine $N_3$, aimantant la pièce de fer inférieure $F_3F_4$, qui sera attirée exactement comme la pièce supérieure l'a été et elle décrira un quart de tour. Le courant passant ensuite successivement

dans les bobines $N_2$ et $N_4$, les effets produits permettront d'obtenir un mouvement de rotation continu.

L'amortisseur du compteur est constitué par un disque de cuivre *f* (*fig.* 14), fixé sur l'axe mobile, et qui se meut entre les branches de deux aimants permanents *m*.

Afin d'éviter la formation d'étincelles sur le commutateur, chaque bobine de dérivation porte deux enroulements : l'enroulement de la bobine en fil de cuivre *w* et un enroulement bifilaire *n* en fil de manganin dérivé sur le premier.

A vide, la consommation de ce compteur ne dépasse pas 2,5 watts. Il se construit des compteurs Peloux pour toutes intensités jusqu'à 600 ampères, sous des tensions jusqu'à 600 volts et pour distributions à courant continu à deux et à trois fils.

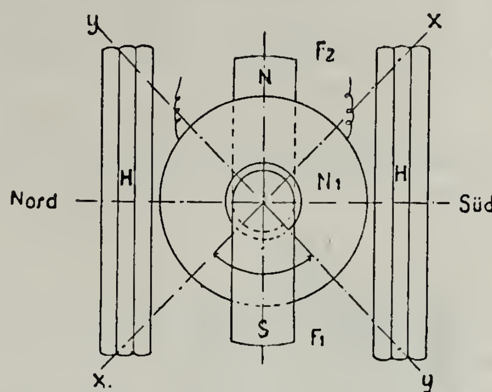
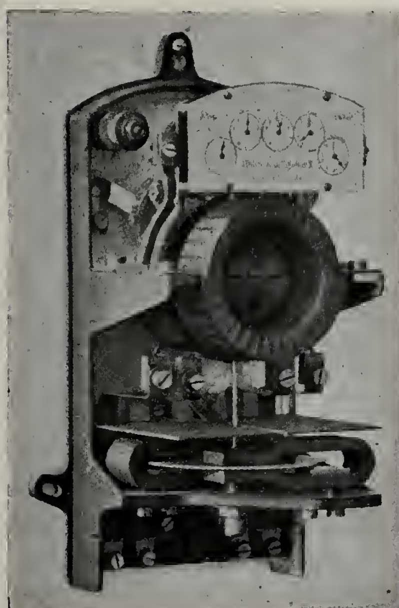


Fig. 16. — Principe du compteur Peloux.

*Compteurs Schuckert.* — Ces compteurs sont construits par l'*Elektrizitäts Aktiengesellschaft vormals Schuckert und C°, de Nuremberg*, et, en France, par la *Compagnie générale d'électricité de Creil.*

Ces compteurs se rapprochent beaucoup, comme construction, du compteur Thomson.

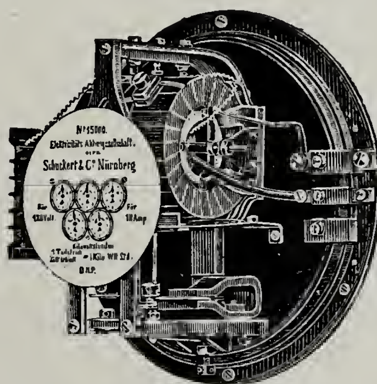
Les figures 17 et 18 représentent respectivement la vue intérieure du compteur type GB et du compteur type GV.


Fig. 17. — Compteur-moteur pour courant continu, type GB.

Comme détails de construction, on peut signaler les suivants :

1° Un écran soustrait les aimants de l'amortisseur à l'influence des bobines ;

2° Pour assurer le démarrage aux faibles charges, une partie du circuit dérivé agit dans le même sens que le circuit inducteur en gros fil. Cette portion du circuit dérivé affecte la forme d'une bobine que l'on peut déplacer de manière à compenser exactement les frottements.


Fig. 18. — Compteur-moteur pour courant continu et courant alternatif, type GV.

Le type GB est exclusivement réservé à la mesure du courant continu.

Le type GV, au contraire, a un circuit dérivé dont la constante de temps est assez faible pour qu'on puisse l'employer indifféremment avec du courant continu ou avec du courant alternatif.

D'après des essais effectués au Laboratoire central d'électricité, les indications de ces compteurs sont très exactes. Elles sont cependant un peu faibles lorsque l'instrument fonctionne sur un circuit à courant alternatif avec des charges fortement inductives.

*Compteur Perdrisat.* — Cet instrument, exposé par la *Société Perdrisat, Blanc et Cie, de Territet (Suisse)*, diffère des compteurs-moteurs ordinaires.

Son induit, dont la forme est particulière, contient du fer, contrairement à la pratique courante.

Le noyau de l'induit est constitué par un moyeu cylindrique supportant quatre rectangles en tôle mince disposés en croix (*fig.* 19). Un fil fin de cuivre isolé est enroulé sur chaque rectangle. Les bobines *a'*, *b'* ainsi constituées sont reliées à un collecteur dont les quatre lames sont en fil d'argent.

Avant de mettre les bobines en place, on les recourbe en demi-cercle, de telle sorte que l'induit, qui rappelle le type d'un induit à pignon, prend la forme représentée en perspective et en coupe transversale par la figure 19.

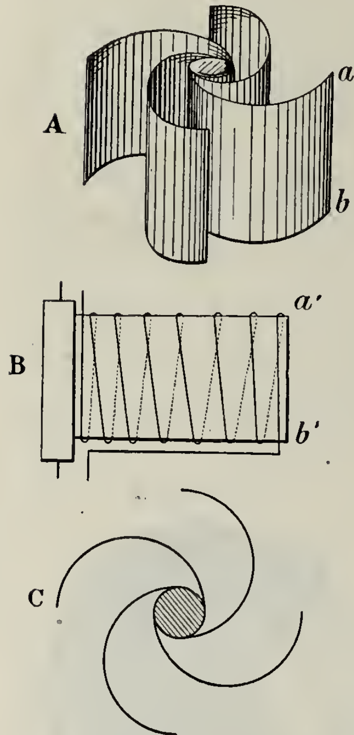



Fig. 19. — Détails du noyau de l'induit du compteur Perdrisat.

A. Vue perspective. — B. Tôle bobinée avant d'être recourbée en demi-cercle. — C. Coupe transversale du noyau.

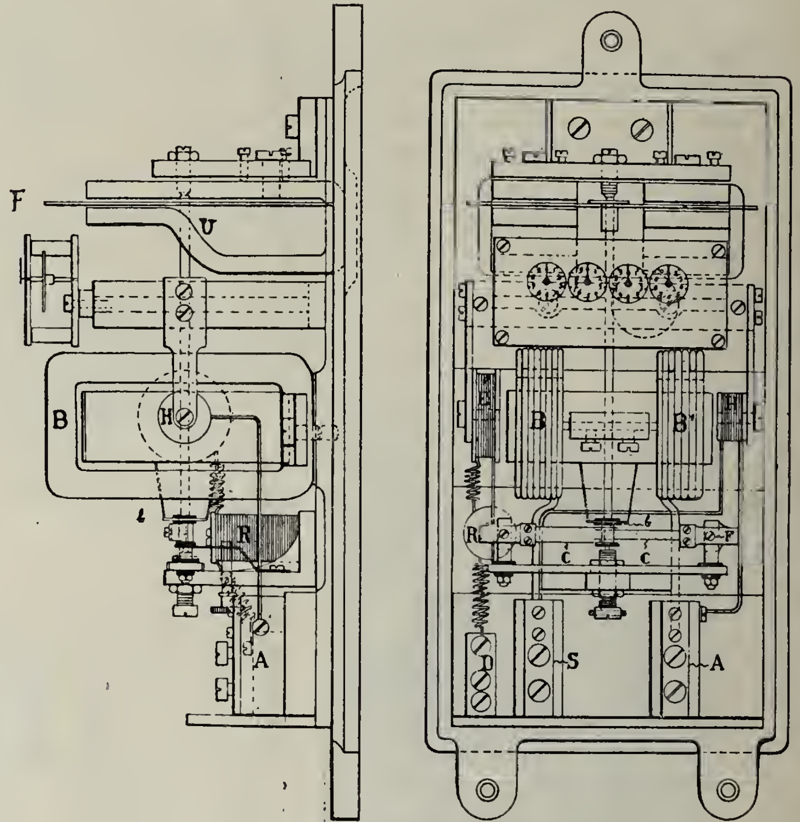



Fig. 20. — Compteur Perdrisat.

Les extrémités des bras recourbés sont maintenues par un croisillon, afin d'éviter toute déformation.

L'induit est disposé à l'intérieur de deux bobines B, B' (*fig.* 20) traversées par le courant principal et servant d'inducteurs.

Son axe, monté sur pointes, porte, à la partie supérieure, un disque amortisseur F en aluminium, engagé entre les pôles d'aimants en forme d'U.

Le collecteur et les balais se trouvent à la partie inférieure.

Un courant dérivé sur la canalisation parcourt en série l'induit, une résistance additionnelle R et une bobine E, celle-ci servant à faciliter le démarrage aux faibles charges. Cette bobine agit comme l'enroulement inducteur complémentaire des compteurs ordinaires ; le couple moteur qu'elle produit équilibre le couple résistant dû aux frottements.

La bobine H est également montée en dérivation. Elle sert à empêcher le compteur de tourner à vide et aussi à parer aux petites irrégularités de marche que pourrait provoquer l'influence du fer de l'induit.

La forme donnée à ce dernier procure un couple très sensiblement constant et assez élevé à cause de la présence du fer.

Cette forme n'est pas aussi parfaite que celle de l'anneau Gramme, mais elle se prête très bien à un bobinage à la machine des sections de l'induit. C'est un sérieux avantage au point de vue de la construction industrielle. Les autres organes de ce compteur ne diffèrent pas en principe de ceux correspondants des compteurs moteurs.

Il peut fonctionner aussi bien avec le courant continu qu'avec les courants alternatifs.

D'après les données du constructeur, ce compteur démarre avec une puissance égale au centième de sa capacité et consomme à vide 4,5 watts, le circuit de l'induit ayant une résistance de 1 000 ohms.

**Compteurs-moteurs fondés sur le principe de Ferraris (champs tournants).** — Ces compteurs sont exclusivement réservés aux courants alternatifs ; ce sont des compteurs-moteurs à intégration continue, dans lesquels l'entraînement d'une masse métallique est produit par un champ tournant ou, plus exactement, par la résultante de deux champs alternatifs présentant une différence de phase. Ces deux champs induisent des courants de Foucault dans la masse métallique et le couple moteur est dû à la réaction des deux systèmes de champs, inducteur et induit.

On voit donc que les compteurs de ce type sont de véritables moteurs d'induction ou moteurs asynchrones.

Le couple résistant, opposé au couple moteur, est dû à des courants de Foucault induits dans un disque solidaire de la masse mobile, disque tournant dans l'entrefer d'aimants permanents.

Le champ tournant inducteur peut être produit par deux bobines *perpendiculaires* entre elles et traversées par des courants décalés plus ou moins parfaitement d'un quart de période.

On peut également obtenir la rotation d'un disque mobile en faisant agir deux champs inducteurs *parallèles* entre eux, mais normaux à ce disque et parallèles à son axe de rotation.

Dans ce cas, le couple moteur provient de la réaction exercée par l'un des deux champs inducteurs sur les courants induits dans le disque par l'autre champ inducteur.

Les compteurs basés sur ce procédé d'entraînement de la masse mobile sont plus particulièrement connus sous le nom de compteurs d'induction.

D'une façon générale, les compteurs basés sur le principe de Ferraris ne sont exacts que pour des courants dont la fréquence est la même que celle du courant d'étalonnage. Les indications fournies par les compteurs à deux champs inducteurs perpendiculaires entre eux sont plus ou moins influencées par la forme des courants.

Les compteurs dont les deux champs inducteurs sont parallèles échappent à cet inconvénient, car les courants induits ont, dans ce cas, la même forme que les courants inducteurs.

Dans les compteurs à champ tournant, les champs inducteurs produisent toujours un petit couple résistant superposé au couple moteur.

Ce couple parasite augmente avec le débit et tend à faire retarder l'instrument aux fortes charges. Il importe, pour éliminer cette cause d'erreur, de rendre négligeable le couple résistant parasite vis-à-vis du couple résistant principal provenant des aimants permanents amortisseurs.

On arrive à ce résultat en employant de forts aimants ou en s'efforçant de compenser le couple résistant parasite par un couple moteur auxiliaire suivant la même loi de variation que lui. Ce dernier couple est obtenu en munissant les pôles de l'électro-aimant principal d'écrans en cuivre les recouvrant partiellement ; ces écrans ont tous leur extrémité dirigée dans le même sens, sens qui est celui de la rotation du disque. Dans le premier cas, on néglige le couple résistant parasite vis-à-vis du couple résistant principal rendu, à cet effet, très énergique.

La seconde solution, préférable au point de vue théorique, est difficile à appliquer à cause de la difficulté du réglage des écrans. On l'emploie cependant dans plusieurs compteurs.

Nous appellerons compteurs Ferraris du premier genre ceux dans lesquels les champs

principaux et dérivés sont perpendiculaires; ceux dans lesquels les champs sont parallèles entre eux seront dits du second genre.

*Compteur Raab.* — Ce compteur, construit par l'*Elektricitäts Aktiengesellschaft vormals Schuckert und C°* et par la *Compagnie générale d'électricité de Creil*, ne comporte qu'un seul disque métallique monté sur un arbre tournant dans des crapaudines en rubis (*fig.* 21). Il est du type Ferraris second genre.

Le champ produit par le courant principal agit perpendiculairement au plan du disque et il en est de même des champs produits par le courant dérivé, d'une part, et par l'aimant permanent amortisseur, d'autre part. L'aimant permanent est très puissant, afin d'empêcher que le couple moteur ne croisse plus rapidement que la puissance à mesurer.

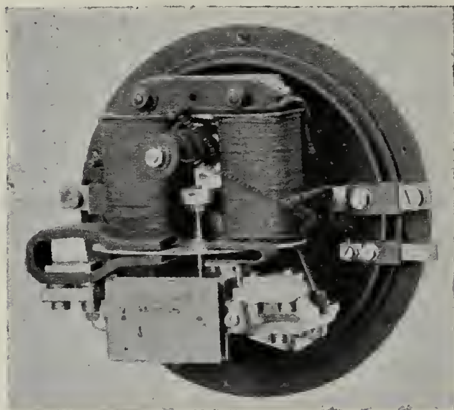


Fig. 21. — Compteur Raab pour courant alternatif.

Le dispositif qui assure un décalage exact d'un quart de période entre le courant dérivé et la tension aux bornes mérite d'être signalé. Le circuit dérivé comporte deux électro-aimants droits. La bobine du premier est simplement montée en dérivation sur les bornes de l'instrument et le courant y est décalé d'un peu moins d'un quart de période. Le second électro-aimant, dont l'action se combine géométriquement avec celle du premier, a pour objet de compléter le décalage; la section du fer de son noyau est plus petite que dans le premier et il comporte aussi beaucoup moins de spires. Ce second électro-aimant a sa bobine également montée en dérivation sur le réseau de distribution : mais ce circuit comporte, en outre, une résistance non inductive. Le courant s'y trouve donc en retard sur la tension, mais d'une quantité moindre que dans le premier électro-aimant, à cause de la présence de la résistance purement ohmique.

En faisant agir les deux électro-aimants en opposition, on peut arriver à rendre le décalage exactement égal à un quart de période.

La figure 22 donne le schéma de l'enroulement des électro-aimants avec leurs connexions. En réalité, les deux circuits dérivés sont chacun roulés respectivement sur une des branches de l'électro-aimant.

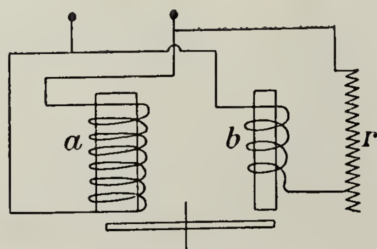



Fig. 22. — Schéma des connexions des deux bobines du compteur Raab.

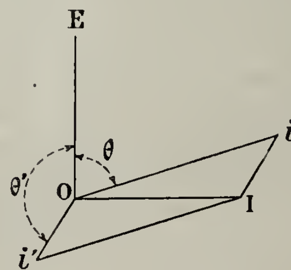



Fig. 23. — Composition des flux du compteur Raab.

Sur la figure 23, on voit la composition graphique des champs tournants. OE est la tension de la distribution et O$i$ le courant dérivé dans la première bobine $a$. L'angle $\theta$ = EO$i$ est inférieur à $\frac{\pi}{2}$; O$i'$ est la direction du courant dans la bobine $b$ dont le circuit comprend la résistance ohmique $r$. A cause de l'inversion du sens du courant en $b$, le décalage du courant O$i'$ est $\pi - \theta'$. En réglant convenablement la valeur de $r$, on arrive à rendre le courant ou le champ résultant OI perpendiculaire à OE.

Les indications de ce compteur sont naturellement influencées par les variations de fréquence, comme dans tous les compteurs pour courants alternatifs fondés sur le principe de Ferraris.

Les compteurs pour courants triphasés sont constitués comme celui qui vient d'être décrit. Lorsque les trois branches de la canalisation sont également chargées, on peut utiliser un compteur à un seul disque. Lorsque les branches sont inégalement chargées, il faut employer des compteurs ayant deux disques moteurs calés sur le même arbre (*fig.* 24).

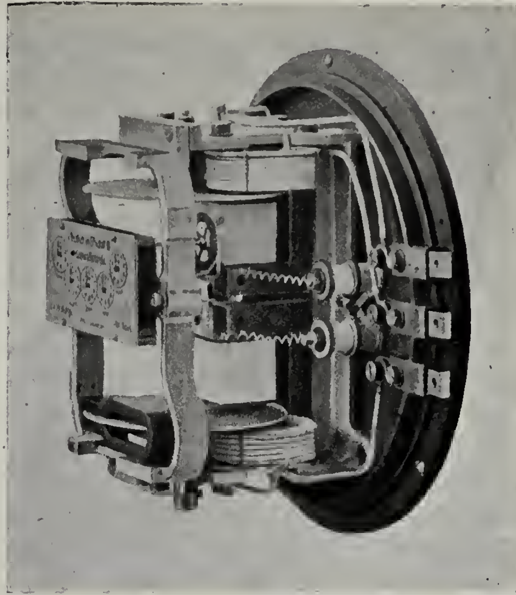


Fig. 24. — Compteur Raab pour courants triphasés.

Comme dans le compteur pour courant alternatif simple, les disques sont gaufrés par étampage, afin de leur donner une rigidité suffisante tout en leur conservant une grande légèreté.

Nous ne donnerons pas ici la théorie de ce compteur; on la trouvera développée dans un intéressant article de M. Rollinger, publié dans *l'Industrie électrique* du 10 octobre 1900.

Nous ferons simplement remarquer qu'il n'est pas nécessaire de pouvoir disposer du point neutre de la canalisation, ni de créer un point neutre artificiel pour faire fonctionner ce compteur.

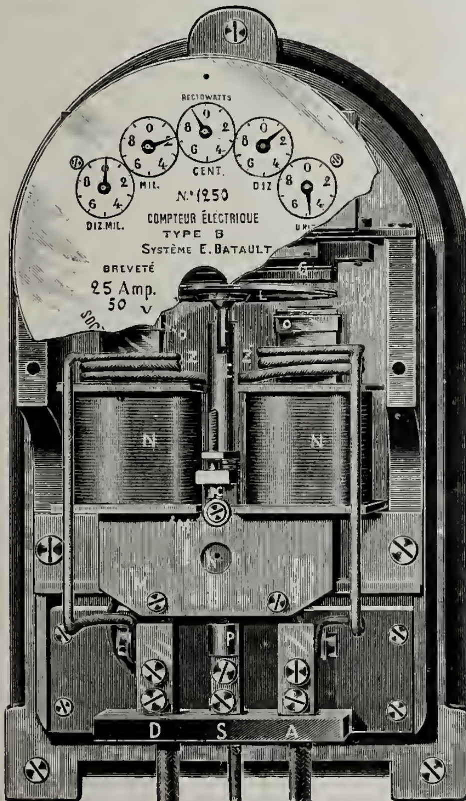



Fig. 25. — Compteur Batault.

*Compteur Batault.* — Ce compteur, du second genre Ferraris (*fig.* 25), était exposé par la *Société Genevoise pour la construction des instruments de physique et de mécanique.*

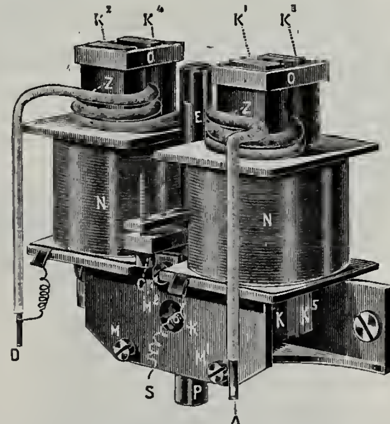



Fig. 26. — Détails du compteur Batault.

Il se compose d'un petit moteur (*fig.* 25 et 26) actionné par le courant à mesurer. La partie mobile de ce moteur est constituée par un très léger disque en aluminium L, qui repose par son axe vertical sur un saphir. Ce disque est mis en marche par l'influence de plusieurs champs alternatifs de phases différentes et, grâce à sa

construction, il n'est soumis à aucun frottement et n'a d'autre effort à vaincre que de mettre en mouvement la minuterie du compteur.

Pour créer les champs moteurs qui doivent actionner le disque, on emploie une sorte de transformateur à trois enroulements constituant la partie originale de l'instrument.

Les deux noyaux en tôles isolées $K_1$, $K_3$ (*fig.* 26) ou leurs symétriques $K_2$, $K_4$ sont séparés sur presque toute leur hauteur par une lame isolante laissant un espace libre vers leurs extrémités. Les trois enroulements sont disposés comme suit : la bobine N, parcourue par une dérivation du courant principal, entoure les deux noyaux; les spires Z, traversées par le courant principal, ne sont placées qu'autour des noyaux antérieurs $K_1$ et $K_2$ ; enfin, le troisième enroulement est constitué par deux bagues de cuivre O qui entourent chacun des noyaux à leur extrémité supérieure, mais en sont isolées électriquement.

Sous l'action des champs résultant de cette combinaison, le disque tourne à une vitesse proportionnelle à la puissance, quel que soit le décalage du courant à mesurer.

Afin de pouvoir régler ou modifier la constante de l'instrument avec facilité, les noyaux antérieurs ($K_3$, $K_1$) sont mobiles dans le sens vertical et ils peuvent, par suite, être rapprochés ou éloignés du disque d'aluminium; les noyaux postérieurs, en forme de fer à cheval, sont fixés sur le bâti.

Pour étalonner le compteur, on règle la position des noyaux mobiles par rapport au disque d'aluminium L ; on peut ainsi modifier ou corriger la constante de l'instrument avec beaucoup de facilité.

Une armature en fer G, placée vis-à-vis de l'espace libre séparant les deux noyaux parallèlement et au-dessus du disque L, sert à régler la proportionnalité du compteur dans toute l'étendue de l'échelle. Cette armature a aussi pour but d'éviter la marche intempestive à vide.

*Compteur Hartmann et Braun.* — Ce compteur, que représente la figure 27, appartient au premier genre. Il se compose d'un circuit magnétique A excité par deux bobines à gros fil tra-

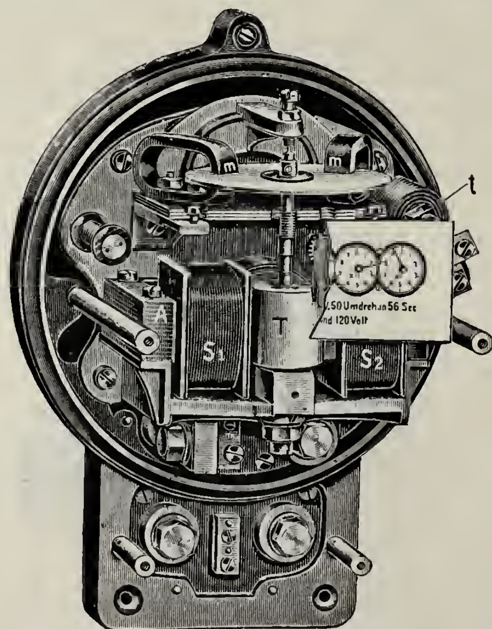



Fig. 27. — Compteur Hartmann et Braun pour courant alternatif.

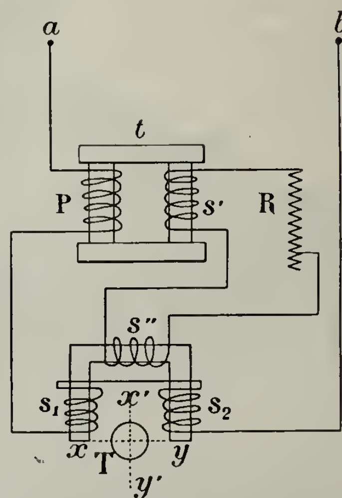



Fig. 28. — Schéma des connexions du compteur Hartmann et Braun pour obtenir en $s_1$, $s_2$ un courant décalé d'un quart de période par rapport à la tension *ab* du réseau.

versées par le courant principal et d'un autre circuit excité par des bobines en fil fin $S_1$, $S_2$. Celles-ci sont montées comme il sera expliqué plus loin.

Le décalage entre le champ créé par les bobines $S_1$, $S_2$, c'est-à-dire entre le courant qui

circule dans ces bobines et la tension aux bornes du compteur, est exactement réglé à un quart de période.

Sous la double influence de ce champ décalé et du champ de la bobine à gros fil, le tambour T, en aluminium, tend à tourner en entraînant un disque amortisseur en aluminium, mobile entre les pôles des aimants $m$. Un système d'écrans en tôles sépare les aimants $m$ des bobines actives du compteur, de façon à éviter toute influence de ces dernières sur les aimants.

Ce compteur ne comporte pas de balais et les frottements sont ainsi réduits au minimum.

Il consomme 3 watts et se met en marche pour les plus faibles charges.

Les indications sont indépendantes du facteur de puissance ; mais elles sont légèrement influencées par de notables variations de fréquence.

Le réglage s'effectue sur place et en s'aidant des indications d'un wattmètre ; il suffit pour cela de déplacer légèrement l'ensemble du système mobile par rapport à la bobine à gros fil.

La figure 28 montre schématiquement comment est constitué le circuit dérivé pour obtenir le décalage d'un quart de période dont nous avons parlé.

Ce dispositif a été employé par MM. Hartmann et Braun dans plusieurs appareils ; il permet d'obtenir un champ tournant avec un courant alternatif simple.

Dans le circuit magnétique de l'enroulement dérivé, le champ, dans l'entrefer, est dirigé suivant $xy$.

L'enroulement traversé par le courant principal produit un champ dirigé suivant $x'y'$ dans un circuit magnétique non figuré. T est le tambour d'aluminium entraîné par le champ tournant résultant de $xy$, $x'y'$ ; $t$ est un transformateur auxiliaire, à circuit magnétique fermé.

Le circuit dérivé en $ab$ s'enroule en P, puis en $s_1$, $s_2$.

Le secondaire $s'$ du transformateur $t$ est fermé sur une résistance non inductive R et sur une bobine $s''$ sur le noyau portant les bobines $s_1$ et $s_2$. Le réglage du décalage s'effectue en faisant varier la résistance R.

*Compteur O. T. Bláthy.* — Ce compteur était exposé par la *Société Ganz et C^ie^, de Buda-Pesth.* C'est un compteur du second genre Ferraris. Le courant principal et le courant dérivé produisent des champs magnétiques normaux à un même disque métallique, disque s'engageant également entre les pôles d'aimants permanents produisant l'amortissement. Le décalage entre le courant ou le champ et la tension dérivée n'est pas exactement d'un quart de période, ainsi que cela a lieu dans le compteur Hartmann et Braun.

Le réglage ne peut donc qu'être approximatif et les indications sont influencées par le facteur de puissance des appareils branchés sur le réseau desservi par l'instrument.

Pour faciliter le démarrage à faible charge, les pôles de l'électro-aimant dérivé sont partiellement recouverts de petits écrans en cuivre rouge. Il en résulte une dissymétrie développant un couple supplémentaire dû à la simple action du circuit dérivé. On empêche la marche à vide en fixant un fragment de fer sur le tambour. Il en résulte une position d'équilibre stable subsistant tant que le courant principal est nul.

Les modèles exposés étaient respectivement de 6, 30, 150 et 300 ampères sous 120 volts.

Un modèle identique était destiné à la mesure de courants de haute tension ; les bobines à fil fin sont alimentées par le secondaire d'un petit transformateur, dont le primaire est dérivé sur le réseau.

*Compteur Ferraris.* — Ce compteur du premier genre était exposé par la *Société Siemens et Halske, de Berlin.* Il se compose d'un léger tambour creux en aluminium B (*fig.* 29), mobile dans l'entrefer ménagé entre un cylindre de fer doux C et les pôles E, E, F, F, d'un anneau A en tôles isolées.

Le courant principal traverse les bobines à gros fil placées sur les pôles F, F, tandis que les pôles E, E sont recouverts de bobines en fil fin montées en dérivation sur le circuit de distribution. Sur l'axe du tambour est calé un disque amortisseur S, en aluminium gaufré, dont les bords s'engagent entre les branches d'aimants permanents M. Le totalisateur est actionné par la vis sans fin D.

Afin de réduire au minimum les résistances dues aux frottements, on communique à toute la partie mobile un mouvement *louvoyant*, disposition imaginée jadis par M. Raffard pour les régulateurs des moteurs à vapeur. A cet effet, l'axe de la partie mobile repose sur une crapaudine H fixée à l'extrémité d'une lame élastique. Un électro-aimant G, excité par une dérivation du courant, fait vibrer cette lame élastique et la partie mobile du compteur est continuellement soumise, de ce chef, à une série de petits déplacements verticaux. Ces déplacements ne dépassent pas quelques dixièmes de millimètre et suffisent pour annuler presque complètement les résistances dues aux frottements.

Afin d'obtenir le démarrage du compteur aux plus faibles charges, le cylindre de fer C est muni de deux petites entailles diamétrales N,N destinées à créer une dissymétrie du champ sous les pôles E,E.

Lorsque les entailles sont placées au milieu des pôles, elles ne produisent aucun effet. Si, au moyen du levier L, on vient à modifier l'orientation du cylindre, les entailles N,N prennent la position figurée en pointillé.

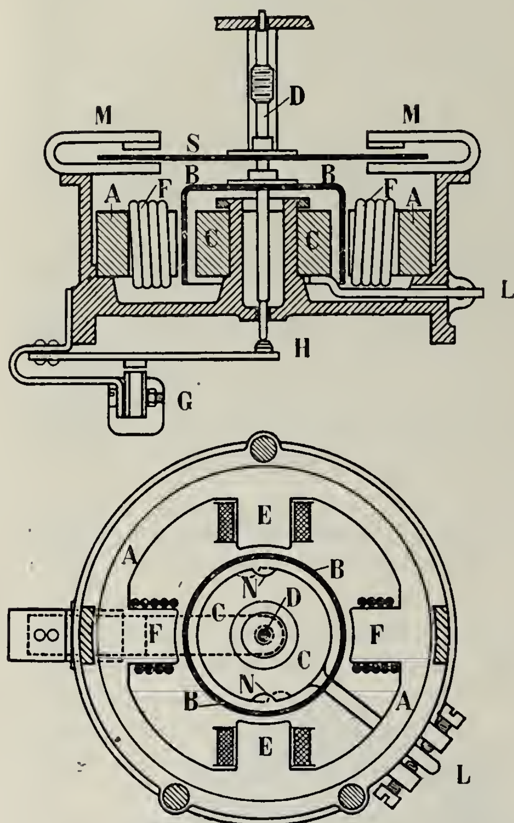



Fig. 29. — Compteur Ferraris.

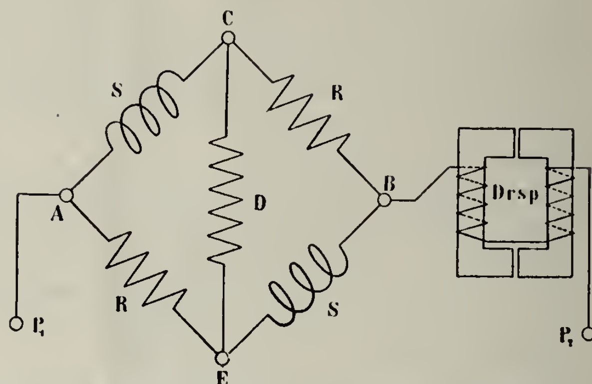



Fig. 30. — Schéma des connexions du compteur Ferraris.

Dans ce cas, le compteur démarre sous la seule influence des pôles E,E. Il marquerait alors à vide.

On arrive à éviter cet inconvénient, tout en équilibrant complètement les résistances passives, en donnant aux entailles une position intermédiaire. Le tambour B tourne alors dès que les électros F,F sont traversés par le courant principal, si faible soit-il.

Pour que les indications soient toujours exactes, il faut qu'il existe un décalage d'un quart de période entre les champs en E,E et en F,F. Voici comment on obtient ce décalage :

Les bobines S,S (*fig.* 30) sont les bobines dérivées placées sur les pôles E,E (*fig.* 29).

Elles sont groupées avec des résistances non inductives R, R, à la façon des branches d'un pont de Wheatstone. Les points C,E sont réunis par une résistance réglable D, non inductive ; en avant de B se trouve une bobine de réactance variable ; $P_1$ et $P_2$ sont les pôles de la canalisation.

En modifiant la self-induction de la bobine de réactance et en agissant sur la résistance D, on obtient le décalage convenable.

La figure 31 montre une vue d'ensemble de ce compteur, dont la minuterie est à chiffres sauteurs.

En pratique, le tambour d'aluminium est percé de deux encoches destinées à créer des points morts et à éviter sûrement que le compteur ne marque à vide.

Cet instrument ne dépense, pour fonctionner, qu'un watt par 100 volts. Pour les hautes tensions ou pour les courants de grande intensité, il est accompagné de petits transformateurs.

Les aimants amortisseurs présentent une particularité : ils sont volumineux et peu aimantés. Grâce à cette disposition, ils sont très peu sujets à perdre une partie de leur aimantation, comme cela se produit souvent, par exemple à la suite d'un court-circuit sur la canalisation de l'abonné.

La Société Siemens et Halske, de Berlin, exposait également un compteur Ferraris pour courants triphasés.

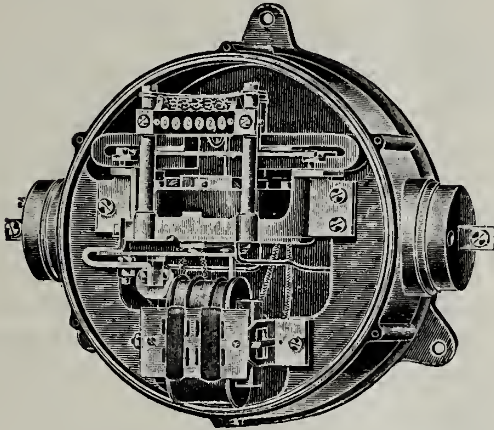


Fig. 31. — Compteur Ferraris.

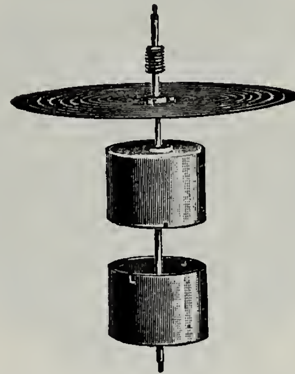


Fig. 32. — Détails du compteur Ferraris pour courants triphasés.

Ce dernier ne diffère pas, en principe, de celui qui vient d'être décrit. Il comporte deux systèmes inducteurs indépendants et superposés, agissant chacun sur un tambour d'aluminium.

Les deux tambours (*fig.* 32) sont calés sur un axe commun portant également le disque amortisseur en aluminium gaufré.

On voit, sur les tambours, les petites encoches diamétrales destinées à les empêcher de tourner sous la seule influence des champs produits par les bobines de dérivation.

*Compteur Helios.* — Cet instrument était exposé par l'*Helios Elektrizitäts Aktien Gesellschaft, de Cologne.* Il ressemble beaucoup aux compteurs Ferraris du second genre, décrits précédemment; mais quelques-unes des particularités qu'il comporte méritent d'être signalées.

Les pôles de l'électro-aimant dérivé sont partiellement recouverts d'écrans en cuivre destinés à faciliter le démarrage aux faibles charges.

Le disque (*fig.* 33) est percé de plusieurs trous dont le but est de créer des points morts. De cette manière, lorsque l'électro-aimant dérivé agit seul, le disque ne peut tourner, car une partie pleine de ce disque s'arrête forcément sous le pôle de cet électro-aimant, puisque cette position correspond à un équilibre stable. On évite ainsi complètement tous les mouvements du compteur pendant la marche à vide.

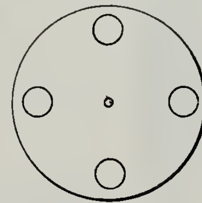


Fig. 33. — Disque du compteur Helios.

Dès que l'électro-aimant à gros fil est traversé par le courant principal, l'effet des points morts disparaît et le compteur se comporte comme si le disque n'était pas percé d'ouvertures.

Les pôles de l'électro-aimant à gros fil sont également munis d'écrans de cuivre destinés à réduire le couple résistant parasite exercé sur le disque par cet électro, concurremment avec le couple moteur.

De cette manière, l'amortissement exercé sur le disque par les aimants permanents peut être considéré comme agissant seul.

*Compteur Hummel.* — Ce compteur, du second genre Ferraris, était exposé par l'*Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft de Berlin;* il est représenté par la figure 34 et se compose (*fig.* 35) d'un disque de cuivre rouge *a* monté sur pointe et s'engageant dans l'entrefer d'un électro-aimant tripolaire *e* et entre les branches d'un aimant permanent *m*.

L'électro-aimant tripolaire est en tôles isolées et comporte trois noyaux $s_1$, $h$, $s_2$. Une armature $r$, disposée au-dessus du disque, ferme le circuit magnétique de cet électro-aimant. Les noyaux $s_1$, $s_2$ sont excités par un courant dérivé du réseau et des bobines traversées par le courant principal entourant les noyaux $s_1$ et $h$.

Pour que le disque puisse tourner sous l'action des flux en présence, il est nécessaire qu'ils soient inégaux dans les entrefers $l_1$, $l_2$ (*fig.* 36).

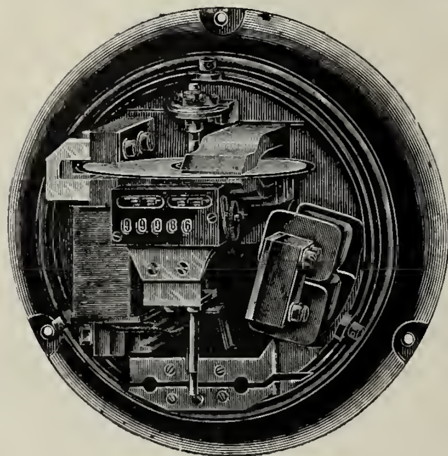


Fig. 34. — Compteur Hummel.

On y arrive en rapprochant davantage l'armature $r$ du côté du noyau $s_1$, de façon à avoir $l_1 < l_2$.

Afin d'éviter que le compteur ne marche à vide sous la seule action du courant dérivé, l'inégalité des entrefers $l_1$ et $l_2$ doit être réglée très exactement.

A ce moment, le couple exercé sur le disque est trop faible pour le faire tourner, mais il est cependant suffisant pour compenser les résistances dues aux frottements.

Le courant principal traverse une bobine à gros fil superposée à la bobine en fil fin placée sur le noyau $s_1$. Le flux, dans l'entrefer $l_1$, augmente donc proportionnellement à l'intensité du courant et avec lui augmente le couple moteur qui entraîne le disque. Pendant ce temps, le flux en $s_2$ se trouve diminué d'autant.

Pour qu'il y ait proportionnalité entre le couple moteur et la puissance, deux conditions doivent être réalisées;

1° Les flux développés dans le noyau $s_1$ par les bobines à gros fil et à fil fin doivent être en concordance de phase.

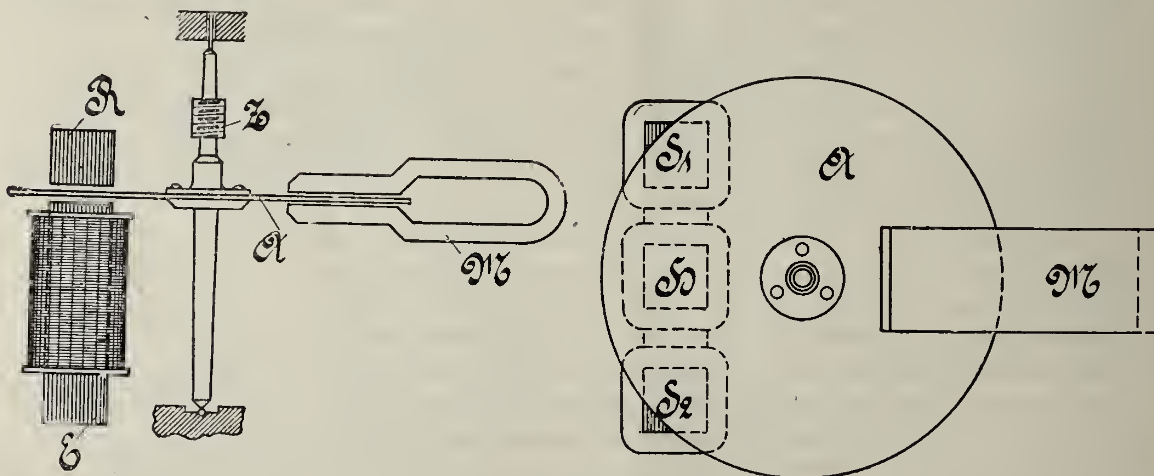


Fig. 35.

Il en résulte que le courant dont on veut mesurer l'énergie ne doit pas avoir de composante déwattée, et c'est ce qui limite l'emploi du compteur aux cas où le réseau n'alimente que des lampes à incandescence;

2° Le noyau dont le flux est renforcé ne doit pas arriver à la saturation.

Comme cette condition n'est guère réalisable, on tourne la difficulté en faisant passer le courant principal dans les quelques spires d'une bobine placée sur le noyau $h$.

Cette bobine produit un flux de sens contraire à celui produit en $s_2$ et le couple moteur est augmenté malgré la saturation du noyau $s_1$.

La figure 36 montre schématiquement la direction des flux engendrés dans les noyaux $s_1$, $h$, $s_2$, par les enroulements à gros fil et à fil fin.

Le mouvement de rotation du disque $a$ est transmis à la minuterie par une vis sans fin $z$ (*fig.* 35). Cette minuterie est à chiffres sautants.

Les erreurs ne dépassent pas ± 1 0/0 dès que la charge est supérieure à 5 0/0 de la capacité du compteur.

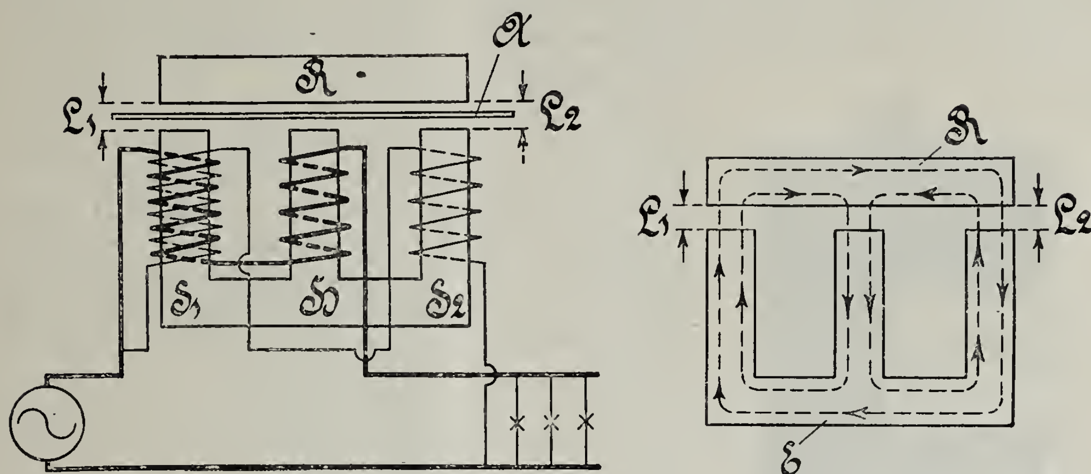


Fig. 36.

Le disque se met en marche sûrement lorsque la charge atteint 1 0/0 et la dépense d'énergie dans les bobines de l'instrument est très faible. Elle ne dépasse pas 3 watts, dont 2 watts à pleine charge dans le circuit principal et 1 watt par 100 volts dans les bobines dérivées.

Ces compteurs se construisent pour toutes tensions jusqu'à 250 volts et pour tous débits inférieurs à 10 ampères.

## COMPTEURS OSCILLANTS

**Principe.** — Dans les compteurs-moteurs, la force motrice qui met en marche l'instrument est proportionnelle à la puissance à mesurer et il est nécessaire, pour obtenir des indications exactes, que le couple résistant soit proportionnel à la vitesse. Les couples supplémentaires dus aux frottements mécaniques, quoique très petits, prennent une certaine importance aux faibles charges et entraînent quelques erreurs que l'on corrige approximativement par des artifices tels que le compoundage.

Pour éliminer complètement ces erreurs, on a réalisé des compteurs dans lesquels la force motrice, toujours empruntée au courant lui-même, est quelconque et largement suffisante pour assurer le mouvement des organes mobiles et dans lesquels le rôle du système de mesure se borne à en régler la vitesse. Ces instruments, dits compteurs oscillants, font avancer le système mobile de quantités constantes à des intervalles de temps variables.

**Compteurs Aron.** — Ces compteurs étaient exposés par la Société Aron dans les sections française, allemande et anglaise.

Ces instruments sont des watts-heure-mètres à intégration continue comportant deux mouvements d'horlogerie distincts, munis de balanciers spéciaux. Ces balanciers, au lieu d'avoir des lentilles massives, comme les balanciers ordinaires, se terminent par des bobines faisant partie du circuit dérivé sur la canalisation. Pendant les oscillations des balanciers, les bobines qu'ils portent se déplacent devant d'autres bobines fixes, parcourues par le courant dont

on veut mesurer l'énergie. Les balanciers sont très courts, leur longueur ne dépassant pas 10 cm, et, dans ces conditions, le nombre d'oscillations effectué pendant un temps donné est très considérable, environ 12 000 par heure.

La section du fil des bobines fixes est d'ailleurs proportionnée à l'intensité maximum du courant dont on veut mesurer l'énergie.

Les deux mouvements d'horlogerie ont leur roue d'échappement en relation avec les roues dentées d'un train différentiel, dont la roue *planétaire* reste fixe ou tourne autour d'un axe, suivant que les rouages des mouvements défilent avec la même vitesse angulaire ou avec des vitesses différentes.

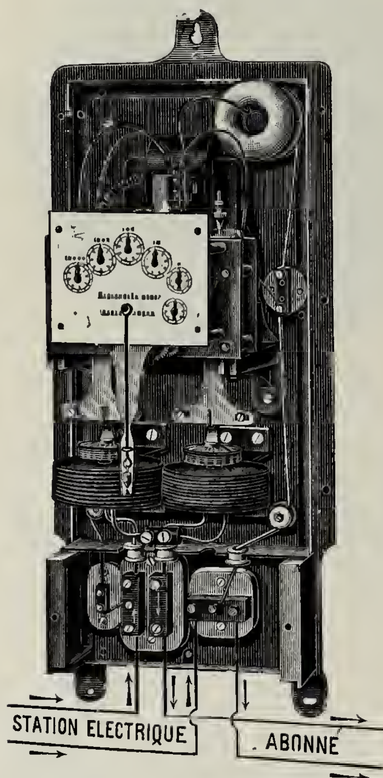



Fig. 37. — Compteur Aron pour distribution à deux fils.

Quand le courant principal est nul, les bobines fixes sont inactives, et seules les bobines des balanciers sont le siège de flux $\varphi$ proportionnels à la tension du réseau.

Dans ces conditions, les balanciers se comportent comme s'ils étaient munis de lentilles ordinaires; on en règle la longueur de manière à ce que les oscillations qu'ils effectuent pendant un temps donné soient *égales*. Le planétaire reste alors immobile et il en est de même de la minuterie du compteur commandée par l'axe de ce planétaire.

Inversement, lorsque les bobines fixes sont traversées par un courant, elles sont le siège de flux $\Phi$ proportionnels à l'intensité de ce courant.

Les flux $\varphi$ et $\Phi$ exercent alors l'un sur l'autre des forces attractives ou répulsives suivant qu'ils sont de même sens ou de sens contraire. Dans le premier cas, le balancier se comporte comme si l'intensité de la pesanteur était augmentée et ses oscillations deviennent plus rapides. Dans le second cas, tout se passe comme si l'intensité de la pesanteur était diminuée et les oscillations du balancier sont ralenties.

Les connexions des bobines sont établies de manière à augmenter le nombre d'oscillations d'un des balanciers et à diminuer celui de l'autre.

Le planétaire tourne alors dans l'espace en entraînant la minuterie du compteur proportionnellement à la *différence* des nombres d'oscillations des balanciers.

Ces nombres sont d'ailleurs proportionnels au produit $\varphi\Phi$ des flux développés par les courants, dérivé et principal, c'est-à-dire proportionnels à la puissance à mesurer.

Les bobines fixes et mobiles dont nous venons de parler forment les circuits du wattmètre du compteur. Les forces en jeu dans cet organe sont excessivement faibles et la puissance absorbée pour faire mouvoir les divers éléments du compteur est empruntée à un ressort dont le remontage s'effectue automatiquement.

*Compteurs pour distribution à deux fils à courant continu ou à courant alternatif.* — La figure 37 montre l'ensemble du compteur Aron pour distribution à deux fils.

Les mouvements d'horlogerie de ces compteurs sont représentés par les figures 38 à 46. Montés entre les platines d'une même cage, ces deux mouvements sont identiques et leurs échappements à ancre $k_1$ sont munis de balanciers terminés par les bobines $m_1$ en fil fin. Afin de pouvoir faire varier au besoin la durée des oscillations des balanciers, ceux-ci sont prolongés à leur partie supérieure par des tiges filetées portant des contrepoids de réglage $m_2$. Le réglage de ces contrepoids rend les oscillations des balanciers à peu près égales pendant la marche à vide. Pour arriver à ce que les deux mouvements d'horlogerie restent constamment soumis à des efforts moteurs *égaux*, les barillets ordinaires à ressort sont remplacés par les roues $f_1, f_2$

d'un premier engrenage différentiel, dont le planétaire $b_2$ reçoit l'effort moteur par l'intermédiaire d'un ressort en boudin terminé par un toc (*fig.* 38).

Ce ressort joue le double rôle de joint articulé et d'accumulateur d'énergie, assurant l'entretien du mouvement des balanciers pendant les courts instants du remontage périodique du ressort $g$ (*fig.* 46). Le toc est entraîné par l'axe à goupille $c$, de manière que le ressort en boudin soit toujours armé.

Grâce à ces dispositions, les deux mouvements d'horlogerie restent constamment soumis à des efforts moteurs égaux, malgré leur différence de vitesse.

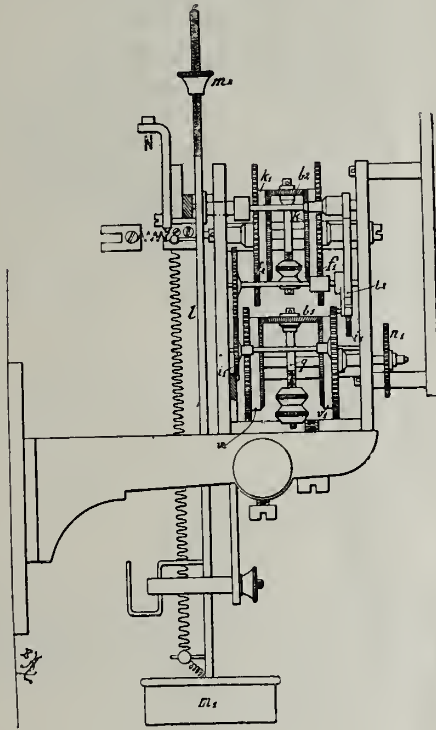


Fig. 38.

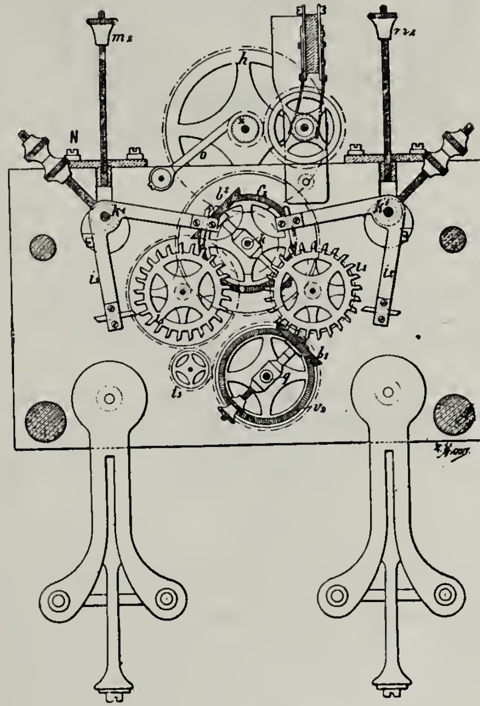


Fig. 39.

Les bobines en fil fin des balanciers sont représentées en $m_1$ (*fig.* 38) ; elles sont attachées à une légère étoile en aluminium, fixée par une vis à la partie inférieure des balanciers. La forme en étoile a pour but d'éviter la production de courants de Foucault. Le courant est amené aux bobines par des fils très fins venant des bornes N et roulés en longs boudins, de façon à rendre négligeable leur élasticité propre et les effets perturbateurs qui en résulteraient. La différence de nombres d'oscillations des balanciers est enregistrée par l'intermédiaire d'un second engrenage différentiel $v_1v_2$ (*fig.* 38), dont les roues sont chacune en relation avec l'un des mouvements d'horlogerie. Les roues $v_1$, $v_2$, devant nécessairement tourner en sens contraire, bien que le sens de rotation des roues d'échappement $i$ soit le même, le mouvement de gauche (*fig.* 39) agit sur la roue $v_2$ par l'intermédiaire d'une roue de renvoi $i_3$.

Finalement l'axe $q$ de la roue planétaire $b_1$ commande la minuterie du compteur (*fig.* 38 et 40).

Le synchronisme obtenu pour les balanciers en agissant sur les contrepoids $m_2$ n'est qu'approximatif; l'erreur résultant du défaut de synchronisme est *annulée* en inversant périodiquement la fonction des balanciers.

Cette inversion consiste à renverser le sens du courant dans les bobines en fil fin $m_2$, de façon que le balancier, qui, précédemment, avait ses oscillations retardées par l'action des flux $\varphi\Phi$, les ait ensuite accélérées, la réciproque existant pour l'autre balancier.

Cette inversion dans la marche accélérée et retardée des balanciers doit nécessairement se produire à intervalles égaux dont la durée est de vingt minutes environ. Voici comment elle est automatiquement réalisée.

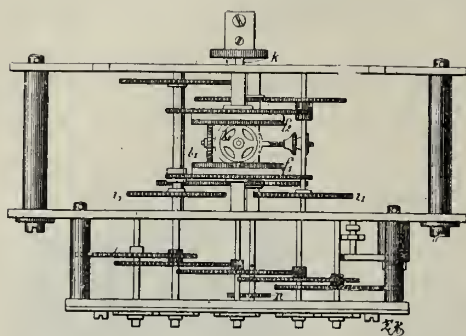
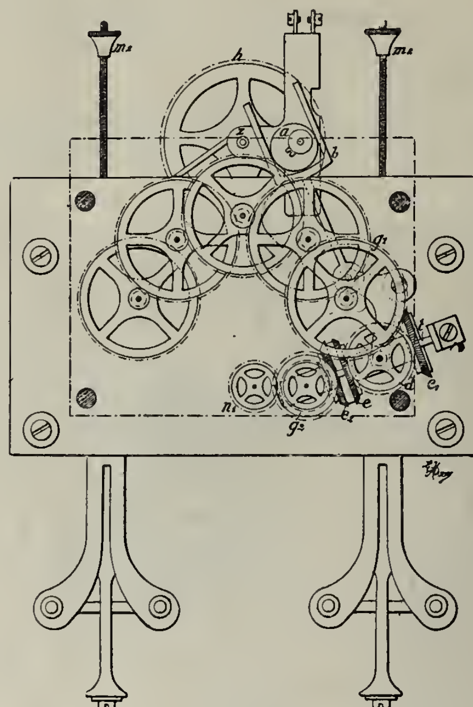


Fig. 40.



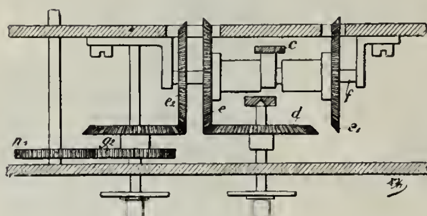


Fig. 42.

Fig. 41.

L'inverseur du courant dans les bobines est représentée en $x$ (*fig.* 43 et 44). Cet inverseur est commandé par le ressort moteur $g$ et effectue *brusquement* un demi-tour toutes les vingt minutes. A cet effet, la roue $h$ (*fig.* 41) est entraînée en même temps que les deux mouvements d'horlogerie et, pendant sa rotation, elle arme progressivement un ressort $l$ (*fig.* 43).

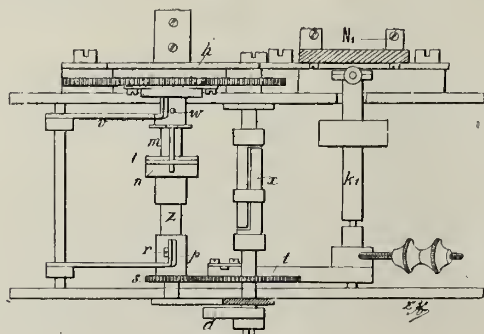


Fig. 43.

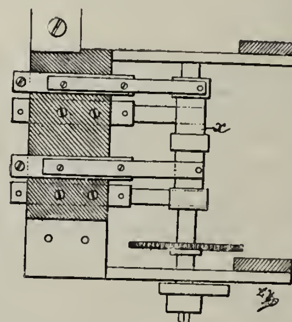


Fig. 44.

A un moment donné, la goupille $n$ soulève le levier $v$, ce qui a pour effet de dégager la goupille $r$, normalement retenue par le levier $p$ solidaire du levier $v$. Le mouvement est analogue à celui dit de *préparation* dans le mécanisme de sonnerie des pendules d'appartement.

Dès que la goupille $r$ est dégagée, la tension du ressort $l$ fait exécuter un tour complet à l'axe $z$ et, à la fin de cette révolution, la goupille $r$ se remet en prise avec le levier $p$. La grande roue $h$ tournant d'une façon continue, le ressort $l$ s'arme de nouveau peu à peu (en vingt minutes), jusqu'à ce qu'il se produise un nouveau déclenchement. A chaque tour de l'axe $z$ correspond un demi-tour de l'inverseur $x$, les deux roues $s$, $t$ étant dentées dans le rapport 1 à 2.

Ce dispositif est fort simple et fonctionne avec une grande sûreté; il est complété par une série de roues d'angle (*fig.* 42 et 43) destinées à faire marquer le compteur toujours dans le même sens, malgré le renversement périodique des rôles des balanciers.

Dans ce but, le planétaire enregistreur n'attaque pas directement le premier mobile $d$ de la minuterie. Par suite de l'emploi de roues et de pignons d'angle $n_1$, $g_2$, $e_2$, le planétaire communique un mouvement de rotation à l'axe $f$ qui supporte les roues d'angle $e, e_1$. Celles-ci sont solidaires d'un canon et peuvent se déplacer longitudinalement à gauche ou à droite, suivant la position de la fourchette $c$. Celle-ci est brusquement poussée d'un côté ou de l'autre par l'action d'une came $a$ agissant sur la fourche $b$, cette came $a$ étant montée au bout de l'axe de l'inverseur $x$ et effectuant en même temps que lui des rotations brusques d'un demi-tour.

Supposons que le balancier de gauche soit accéléré par l'action des flux $\varphi$, $\Phi$ tandis que le balancier de droite est retardé.

Le planétaire enregistreur fait tourner l'axe $f$ (*fig.* 42) dans un certain sens et c'est la roue $e$ qui actionne le premier mobile $d$ de la minuterie du compteur.

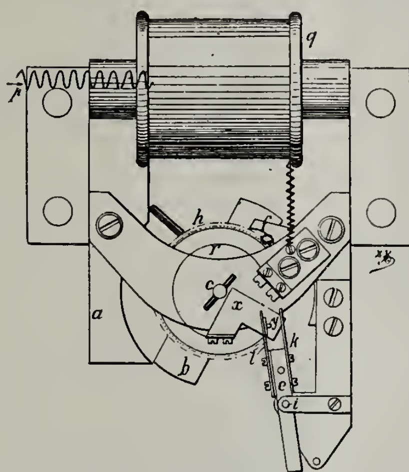



Fig. 45.

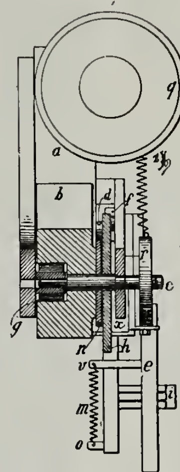



Fig. 46.

Quand le rôle des balanciers est interverti, l'axe $f$ tourne en sens inverse du sens précédent; mais la roue $e$ est alors dégagée et c'est la roue $e_1$ qui se trouve en prise avec le mobile $d$ de la minuterie.

L'inversion de sens du courant dans les bobines en fil fin élimine l'erreur qu'introduirait le défaut de synchronisme des balanciers considérés, lorsque le compteur marche à vide.

L'inversion du courant se produit brusquement, à intervalles égaux, et la minuterie est actionnée, suivant le cas, soit par la roue $e$, soit par la roue $e_1$ ; par suite, la roue $d$ et celles de la minuterie tournent toujours dans le même sens.

Les organes du remontage électro-automatique sont représentés par les figures 45 et 46.

Un électro en fer à cheval $a$ peut, lorsqu'il est excité par un courant, faire exécuter un quart de tour à l'armature $b$, de manière à lui faire occuper une position perpendiculaire à celle qui est représentée sur la figure 45. Une butée limite l'amplitude du mouvement. L'armature $b$, dans son mouvement de rotation, arme le ressort $g$ (*fig.* 46) dont la tension reste acquise lorsque le courant cesse de circuler dans la bobine de l'électro-aimant $q$. Ceci se produit grâce au cliquet $f$ qui est en prise avec les dents de la roue à rochet $r$.

L'axe $c$ de cette roue à rochet porte la goupille qui entraîne le toc relié élastiquement au planétaire $b_2$ (*fig.* 38), actionnant les mouvements d'horlogerie.

Pendant le défilage des mouvements d'horlogerie, le fer doux $b$, qui avait pris, au moment du remontage, une position perpendiculaire à celle que représente la figure 45, revient peu à peu à sa position primitive, par suite de la détente progressive du ressort moteur $g$.

L'électro-aimant de remontage est actionné par un commutateur automatique *i* qui fonctionne de la manière suivante :

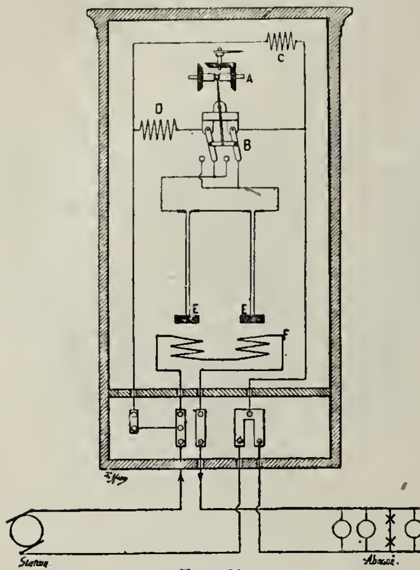



Fig. 47.

A. Commutateur mécanique de la minuterie } Fonctionnant
B. Commutateur électrique du courant dérivé } ensemble.
C. Électro de remontage automatique } En dérivation
D. Résistance additionnelle des } du
E. Balanciers du compteur } courant principal.
F. Bobines à gros fil du courant principal.

Ce commutateur bascule autour de son axe *i*, d'un côté ou de l'autre, par le jeu d'un ressort de rappel *m*, dès qu'il franchit sa position moyenne.

Dans la position représentée figure 45, le circuit de l'électro-aimant *q* est fermé par la goupille *y*, reliée élastiquement au moyen du ressort *r* à l'un des fils de l'électro. La goupille *y*, plantée sur la pièce *x*, appuie sur le ressort *l* du commutateur et le courant qui arrive à ce ressort *l* traverse la bobine *q*.

L'armature *b* effectue un quart de tour, comme nous l'avons dit plus haut, mais la goupille *x*, qui participe à ce mouvement, fait basculer le commutateur et le courant est interrompu dans l'électro-aimant.

Quand la pièce *b* revient à la position figurée, la goupille *y* fait de nouveau basculer le commutateur, le courant excite momentanément l'électro *q* et ainsi de suite.

On voit donc que, grâce au fonctionnement de l'interrupteur automatique, la fermeture et la rupture du circuit de l'électro *q* se font brusquement, bien que le mouvement de l'armature *b* soit relativement lent. En pratique, c'est environ toutes les

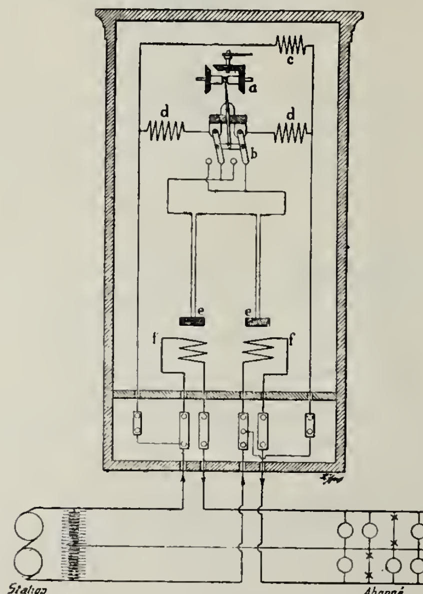



Fig. 48.

A. Commutateur mécanique de la minuterie } Fonctionnant
B. Commutateur électrique du courant dérivé } ensemble.
C. Électro de remontage automatique } En dérivation
D. Résistances additionnelles des } du
E. Balanciers du compteur. } courant principal.
F. Bobines à gros fil du courant principal.

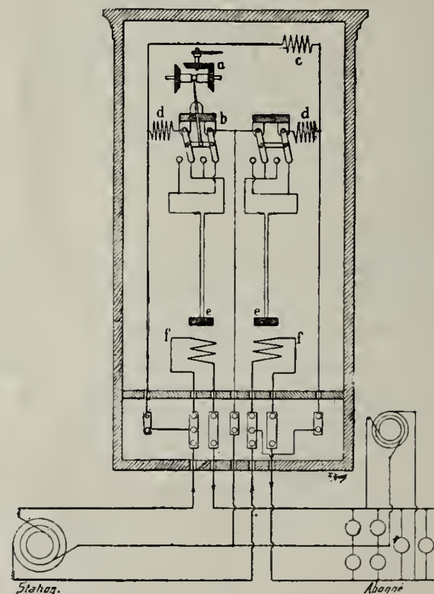



Fig. 49.

A. Commutateur mécanique de la minuterie } Fonctionnant
B. Commutateur électrique du courant dérivé } ensemble.
C. Électro de remontage automatique } En dérivation
D. Résistances additionnelles des } du
E. Balanciers du compteur. } courant principal.
F. Bobines à gros fil du courant principal.

vingt secondes que s'effectue le remontage. Le courant ne traverse l'électro *q* que trois fois par minute et, chaque fois, pendant une fraction de seconde seulement. L'énergie électrique consommée par le remontage est donc très faible.

L'électro-aimant du mécanisme de remontage est monté en dérivation entre les conducteurs principaux ; il est bobiné de manière à fonctionner sous 110 volts et sans l'emploi de résistances additionnelles.

Celles-ci, nécessaires dans le circuit des bobines à fil fin des balanciers, sont formées d'une carcasse en porcelaine sur laquelle le fil de constantan isolé est enroulé en double pour éviter la

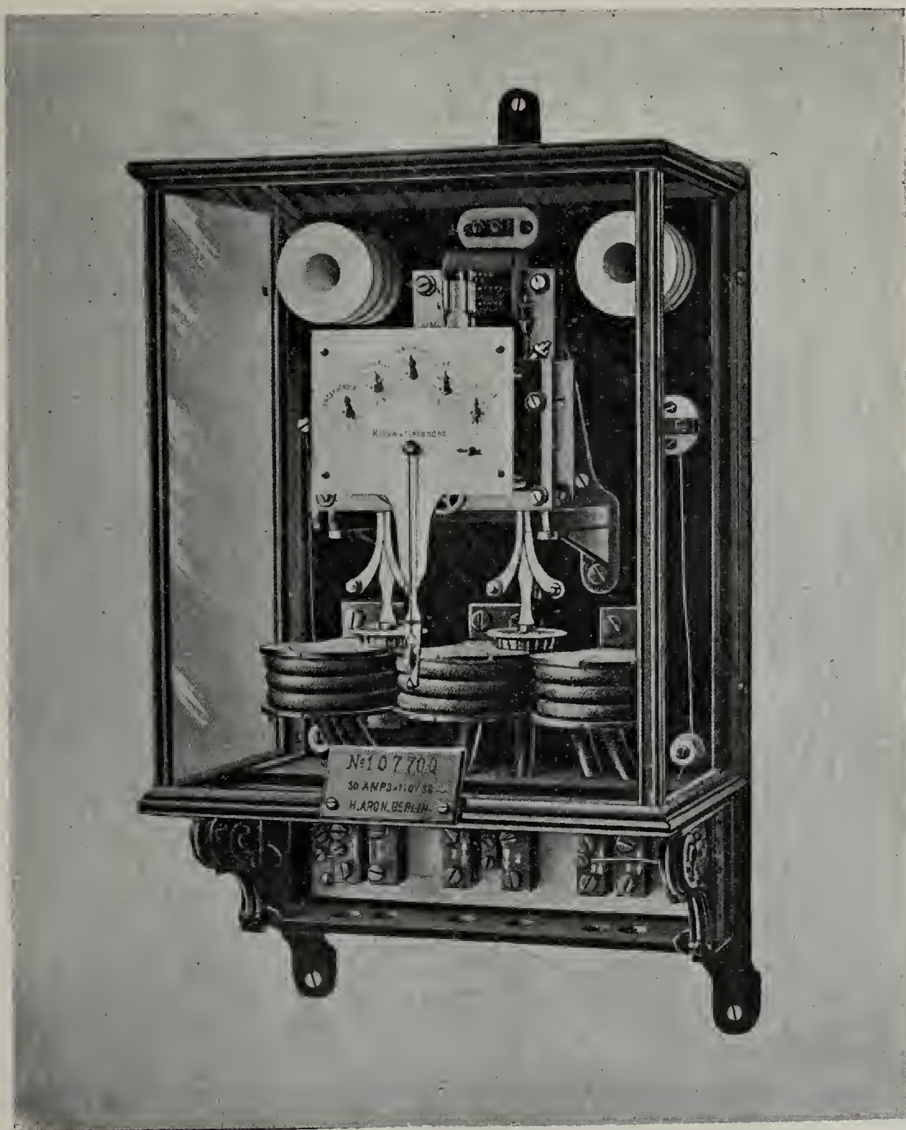



Fig. 50. — Compteur Aron à trois bobines fixes pour courants triphasés.

self-induction. La bobine de résistance est visible en haut et à droite de la figure 37. Tout le circuit dérivé est en constantan, de telle sorte que les indications de l'instrument sont indépendantes des variations de température, avantage très précieux.

Les figures 47 à 49 montrent schématiquement le montage des compteurs Aron dans leurs diverses applications.

Le type figure 47 sert pour les courants continus ou alternatifs avec distribution à deux fils.

Le type figure 48 est disposé pour distribution à trois fils et l'on construit de même un type pour les canalisations à cinq fils ;

Le type figure 49 est spécial pour courants alternatifs triphasés.

Les légendes qui accompagnent les figures 47 à 49 font bien comprendre la marche des courants et dispensent de plus amples explications sur ce sujet.

Les compteurs Aron à remontage électro-automatique se construisent pour toutes intensités de courants et pour toutes tensions.

Employés pour les courants alternatifs, les compteurs Aron fournissent des résultats exacts aussi bien aux faibles qu'aux fortes charges, et cela quel que soit le décalage du courant. Cette dernière propriété tient à l'extrême sensibilité du compteur, sensibilité qui permet de réduire à presque rien les ampères-tours du circuit dérivé.

*Compteur pour courants triphasés.* — Le compteur pour distribution mixte par courants triphasés ne diffère des précédents que par l'adjonction d'une troisième bobine fixe à gros fil (*fig.* 50).

Cette nouvelle bobine, placée entre les deux premières convenablement écartées à cet effet, agit à la fois sur les deux bobines mobiles fixées aux balanciers. Le balancier de gauche est influencé par la bobine fixe de gauche et par celle du milieu, qui agit en sens inverse de la pre-

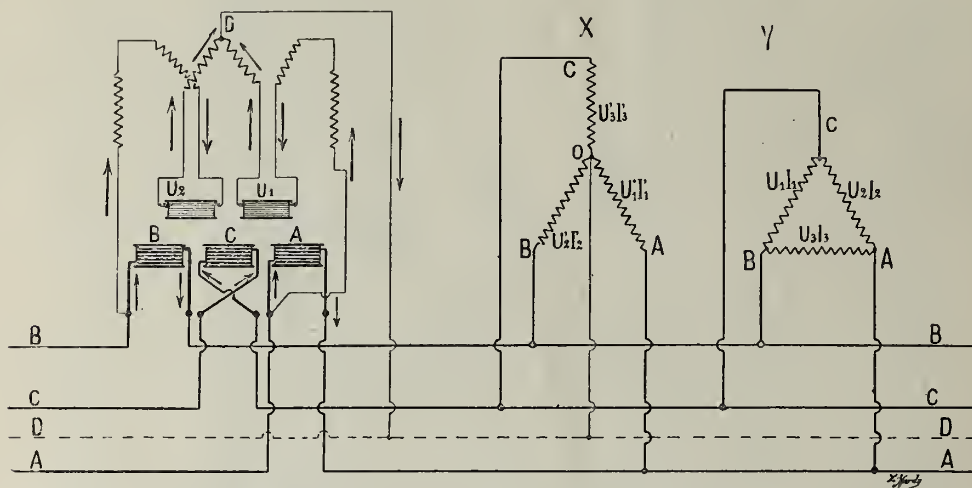



Fig. 51. — Schéma de montage du compteur Aron pour distribution mixte par courants triphasés, avec ou sans conducteur neutre.

mière. Le balancier de droite est influencé par la bobine fixe de droite et, en sens inverse, par celle du milieu.

Les appareils d'utilisation, lampes et moteurs, alimentés par des courants triphasés, peuvent être groupés suivant le montage en triangle ou suivant le montage en étoile.

La combinaison de ces deux modes de groupements constitue le système mixte.

Quand on n'emploie que trois conducteurs pour la distribution, on dispose d'une tension U entre deux quelconques de ces conducteurs.

Si on fait usage du montage en triangle, la tension sur chaque pont est U.

Si on emploie le montage en étoile, la tension sur chaque branche de l'étoile est $\frac{U}{\sqrt{3}}$ et il y a nécessairement un point neutre.

Il est d'usage de grouper les lampes suivant le deuxième mode et de réserver le premier pour l'alimentation des moteurs; mais on peut aussi faire l'inverse.

Avec trois conducteurs, la surcharge d'une phase affecte les autres phases, relativement à la diminution de tension. C'est là le cas qui se produit quand les lampes ne sont pas également réparties.

Si on fait usage d'un quatrième conducteur, appelé fil neutre, puisque c'est à lui que se réunissent les points neutres des divers groupements du réseau, on fait disparaître l'influence de la surcharge d'une phase sur les autres.

La section du fil neutre est inférieure à celle des autres conducteurs, puisque ce fil ne supporte que le courant en excès de la phase surchargée.

L'emploi du fil neutre se répandant de plus en plus, M. Aron a combiné un compteur pour distributions mixtes par courants triphasés avec quatre fils.

Ce compteur indique exactement l'énergie totale consommée, que les phases soient également ou inégalement chargées. Il s'applique d'ailleurs aussi bien au cas d'un système de distribution triphasée avec trois conducteurs seulement qu'à celui où l'on emploie un quatrième fil.

La figure 51 montre comment doivent être reliées les diverses bobines fixes et mobiles du compteur.

Celui-ci enregistre l'énergie dépensée dans les appareils d'utilisation X, Y.

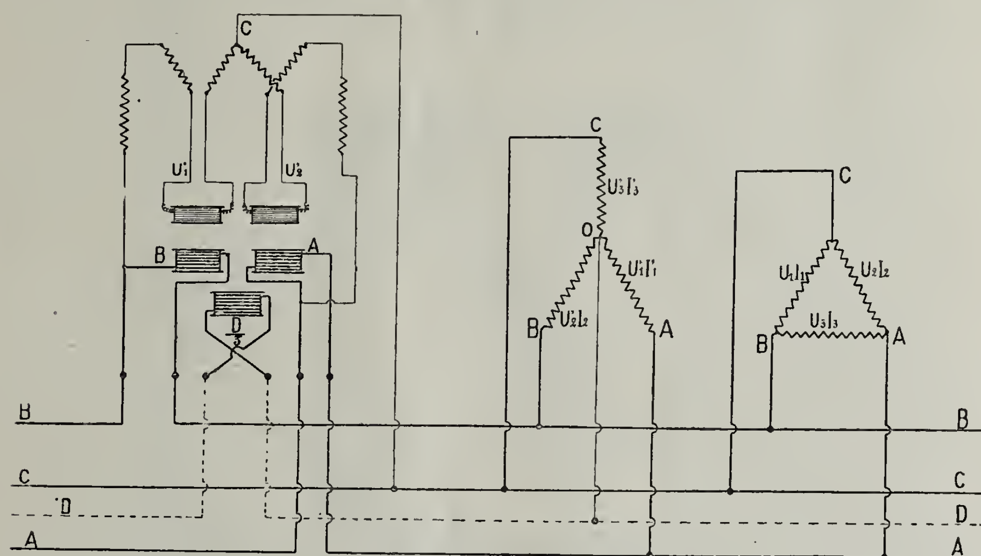



Fig. 52. — Schéma de montage du compteur Aron (2e disposition des bobines fixes).

A un instant donné, les courants circulent dans les enroulements du compteur comme le montrent les flèches.

Bien que cette disposition soit très simple, il y a des cas où elle est d'une application difficile.

Dans les compteurs Aron, les balanciers sont toujours au même écartement, afin de ne pas modifier le mécanisme et de conserver à tous les instruments le même encombrement. Il peut alors arriver qu'il n'y ait pas une place suffisante pour loger les trois bobines fixes sur un même plan horizontal. Ceci se présente, par exemple, pour les compteurs qui doivent supporter des courants intenses. Les bobines fixes n'ont, dans ce cas, qu'une spire; mais leur diamètre est, par contre, relativement grand.

On dispose alors les bobines comme le montre la figure 52. Les bobines fixes de gauche et de droite sont à leur écartement normal. La bobine fixe médiane est disposée en dessous des précédentes et à une distance telle que son effet soit le tiers de celui qu'on obtiendrait si cette bobine était dans le même plan que les autres.

Comme précédemment, les balanciers ont leurs bobines reliées aux conducteurs A, B ; mais, cette fois, la sortie de ces bobines est réunie au conducteur C.

S'il n'y a pas de conducteur neutre, la bobine D demeure inerte et ses bornes restent libres.

En résumé, le compteur Aron pour distributions mixtes par courants triphasés s'applique à tous les cas, que la distribution comporte ou non un fil neutre.

Si les dimensions des bobines fixes empêchent de choisir la disposition figure 51, on emploie celle de la figure 52.

La solution est donc tout à fait générale.

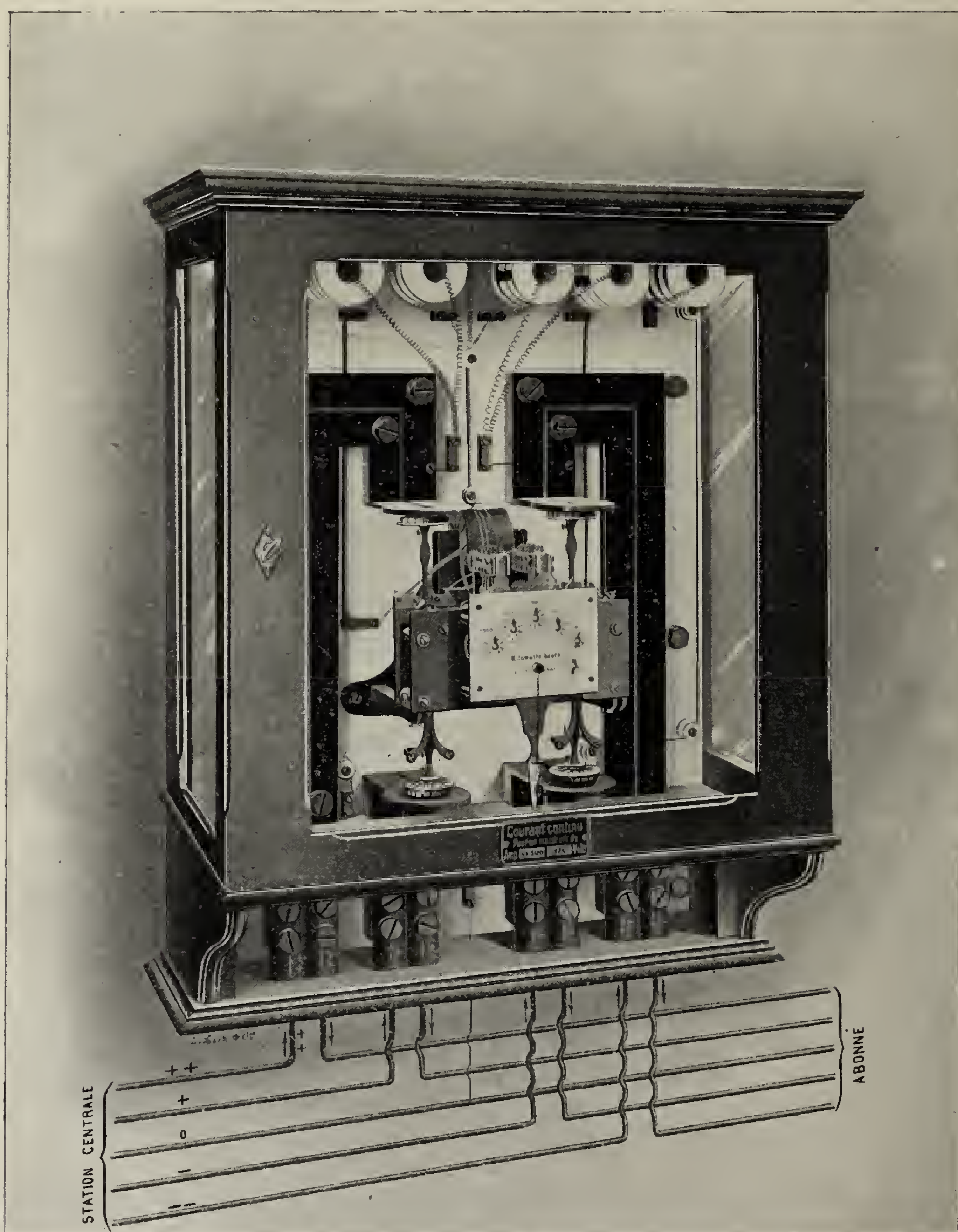



Fig. 53. — Compteur Aron pour distribution à cinq fils.

*Compteur pour distribution à cinq fils.* — Au point de vue du principe, ce compteur ne diffère pas du compteur ordinaire à remontage électro-automatique. Il est représenté par la figure 53.

Les bobines *a*, *b*, *c*, *d*, fixes traversées par le courant principal sont ici au nombre de quatre et sont parcourues chacune par le courant d'un des quatre fils de la distribution.

Le fil neutre est raccordé simplement aux circuits dérivés, comme on peut le voir sur la figure 54, qui montre les diverses connexions.

Les bobines fixes n'ont qu'une spire dans le modèle représenté par les figures 53 et 54 qui peut supporter 100 ampères par pont.

Les balanciers, au nombre de deux, ont chacun deux bobines en fil fin, une placée à la partie inférieure du balancier, l'autre à la partie supérieure ; ces bobines sont représentées en *e*, *f*, *g*, *h*.

Les résistances additionnelles, au nombre de cinq, sont enroulées dans les gorges de poulies de porcelaine disposées à la partie supérieure du compteur.

Le mécanisme d'inversion est double, puisqu'il y a deux paires de circuits dérivés. Le compteur a une capacité de 4 × 100 ampères sous 125 volts, soit 50 kilowatts.

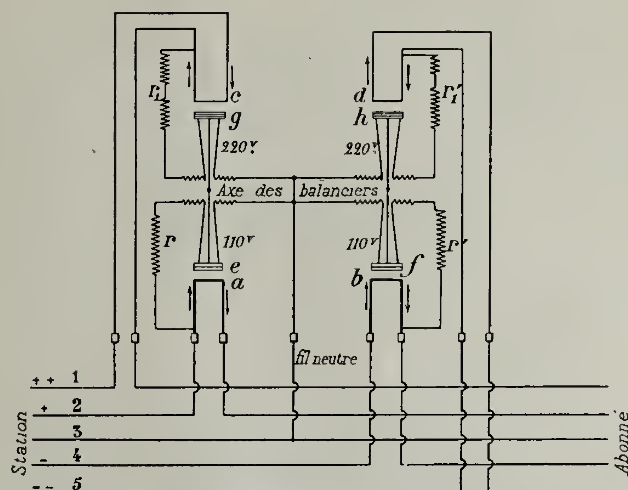



Fig. 54. — Schéma des connexions du compteur Aron pour distribution à cinq fils.

*Compteur pour courants alternatifs de haute tension.* — Les compteurs de haute tension ont leurs bobines à gros fil parcourues par le courant principal. Ces bobines sont montées sur marbre en vue de l'isolement qu'il est nécessaire de conserver par rapport à la masse et à la terre.

Le circuit dérivé qui alimente les bobines des balanciers ainsi que l'électro-aimant du remontage automatique est desservi par le secondaire d'un petit transformateur.

Le compteur représenté par la figure 55 est destiné à une distribution triphasée. Les conducteurs 1 et 3 du réseau viennent passer directement à travers les bobines en gros fil 1 et 2 du compteur.

Les trois bobines primaires du transformateur réducteur de tension sont reliées, par une de leurs extrémités, aux trois conducteurs du réseau et leurs autres extrémités sont soudées ensemble en formant un point neutre. Les bobines secondaire sont également un point neutre et leurs extrémités A, B, C entrent dans le compteur, comme le montre la figure 55. Le transformateur est très soigneusement isolé ; les enroulements sont bobinés sur des carcasses épaisses en micanite et les bornes sont isolées sur des blocs de porcelaine.

Ces compteurs sont réglés pour la fréquence normale du réseau sur lequel on doit les brancher. Ce réglage, qui n'est pas indispensable pour la partie wattmètre du compteur, est nécessaire pour le remontage automatique, la réactance de son électro variant nécessairement avec la fréquence.

A titre de renseignement, voici les données d'enroulement du transformateur d'un compteur de 12 ampères sous 6 000 volts.

Tension primaire = 6 000 volts; tension secondaire = 200 volts.

Rapport théorique de transformation $= \frac{6\,000}{200} = 30.$

Le secondaire comprend 300 spires en fil $\frac{7}{10}$ et a une résistance de 2,5 ohms. Le primaire,

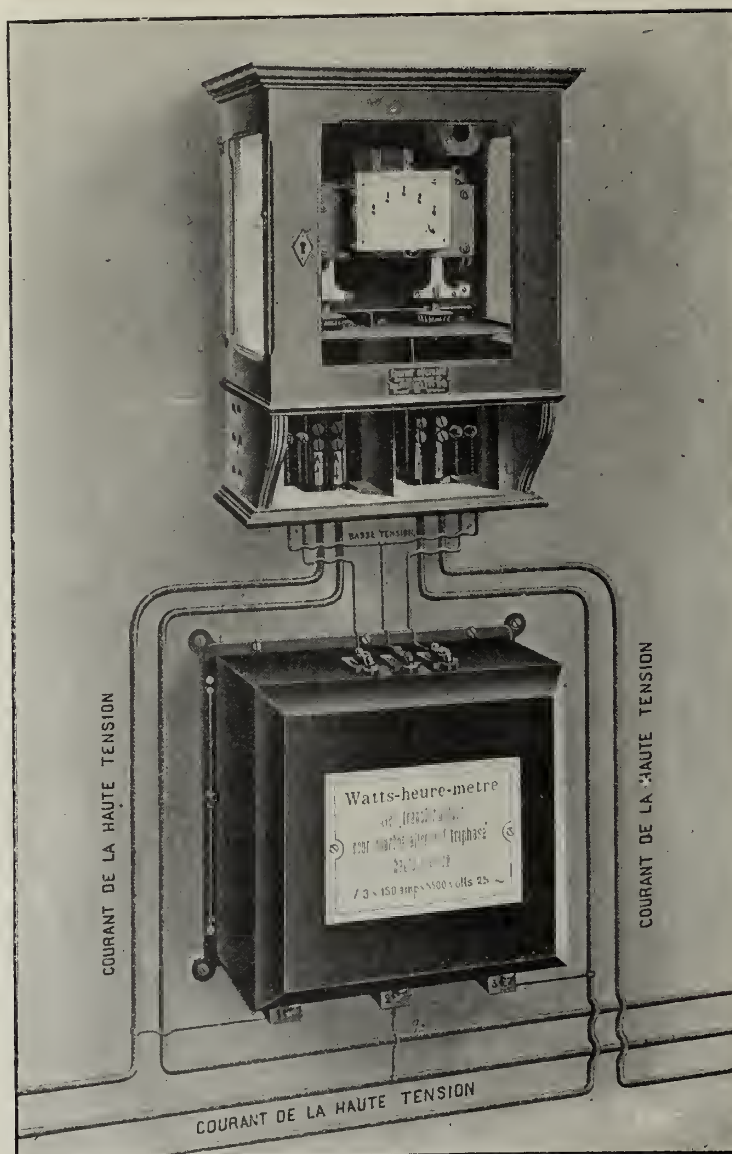



Fig. 55. — Compteur Aron pour courants triphasés à haute tension.

qui devrait n'avoir que 9 000 spires, en a 9 630. Cette augmentation de 7 0/0 sert à compenser les chutes réactive et ohmique de tension.

Ce transformateur, malgré ses dimensions très réduites, a un rendement de 0,93.

*Compteur pour charge et décharge d'accumulateurs.* — Dans ce compteur, le totalisateur est double et comprend une série de cadrans pour enregistrer la charge et une autre série pour la décharge des accumulateurs.

La figure 56 suffira à faire comprendre comment le système intégrateur n'entraîne que l'un ou l'autre des totalisateurs.

L'axe BB du planétaire intégrateur MM'B', équilibré par le contrepoids B″, tourne dans un

sens ou dans l'autre, suivant le sens du courant dans les bobines en gros fil, c'est-à-dire suivant que le courant entre dans la batterie d'accumulateurs ou en sort.

Cet axe B se prolonge en avant des platines P, P′ et porte goupillé le bras équilibré AA. Celui-ci supporte deux cliquets $D_1$, $D_2$, disposés en sens inverse l'un de l'autre. Les roues $C_1$, $C_2$, montées folles autour de l'axe BB, mais respectivement solidaires des roues $A_1$, $A_2$, commandent le premier mobile des totalisateurs.

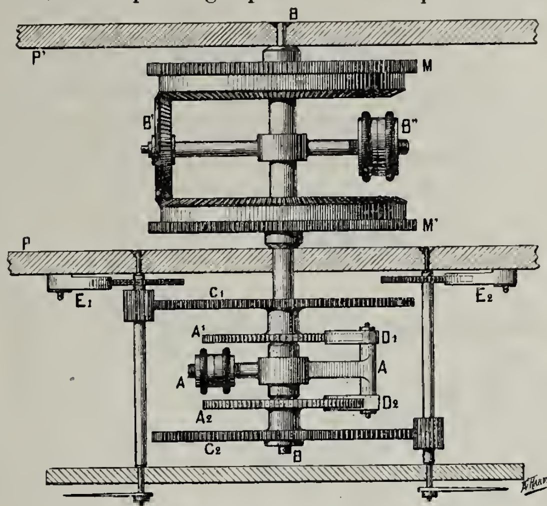


Fig. 56. — Mécanisme d'enregistrement du compteur Aron pour charge et décharge d'accumulateurs.

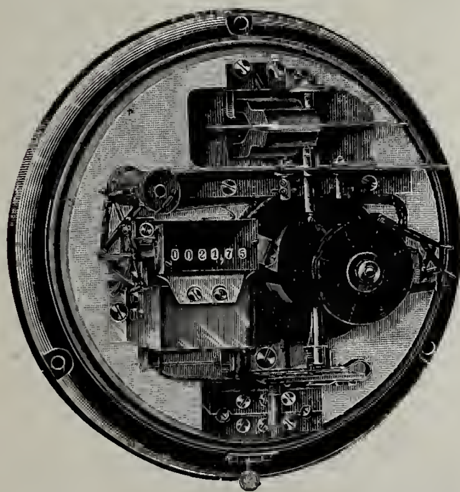
Le cliquet $D_1$ ne peut entraîner que la roue $A_1$ lorsque le planétaire tourne dans le sens correspondant au courant de charge; ce sont les aiguilles des cadrans de gauche qui enregistrent. Au contraire, quand il s'agit d'un courant de décharge, le cliquet $D_2$ entraîne seulement la roue $A_2$ et l'enregistrement se produit sur les cadrans de droite.

Les rochets $E_1$, $E_2$ servent à empêcher tout retour en arrière des aiguilles des deux séries de cadrans, de telle sorte que toute division enregistrée, soit comme charge, soit comme décharge, reste acquise.

Le rapport des indications des cadrans de droite et de gauche fait constamment connaître le rendement en énergie des accumulateurs.

Les divers types de compteurs Aron se construisent pour tous débits et toutes tensions.

**Compteur de l'Allgemeine Elektricitäts Gesellschaft, de Berlin.** — Cet instrument, destiné aux circuits à courant continu, est fondé sur le principe des impulsions électrodynamiques périodiques imprimées à une bobine mobile par une bobine fixe; il constitue un compteur à équipage oscillant. La bobine à gros fil est traversée par le courant dont on veut mesurer l'énergie, tandis que la bobine mobile est parcourue par un courant dérivé, dont l'intensité est proportionnelle à la tension du courant principal. Le sens de ce dernier étant constant, on inverse périodiquement le sens du courant dérivé au moyen d'un commutateur automatique, de telle sorte que la déviation de la bobine mobile se produit successivement dans un sens ou dans l'autre. L'amplitude de ce mouvement est constante et limitée par des butées. L'énergie emmagasinée dans le système mobile est fonction des intensités du courant principal et du courant dérivé. Suivant qu'elle est plus ou moins grande, l'accélération qui agit sur la bobine en fil fin est elle-même plus ou moins élevée. Les oscillations de cette bobine sont donc d'autant plus nombreuses que la puissance électrique est plus considérable.


Fig. 57. — Compteur oscillant de l'Allgemeine Electricitäts Gesellschaft.

L'énergie emmagasinée dans le système est d'ailleurs absorbée par un frein électromagnétique et les impulsions successives sont totalisées par une minuterie.

Ce compteur, dont la figure 57 montre l'aspect d'ensemble, se compose essentiellement (*fig.* 58) d'une bobine fixe *h* traversée par le courant principal et d'une bobine annulaire *s*, en fil fin, dans laquelle circule le courant dérivé.

Cette bobine est solidaire d'un axe *a* pivotant sur des crapaudines en rubis. L'axe porte vers son extrémité inférieure une chape qui sert à amener le courant à la bobine *s*, par l'intermédiaire de petits ressorts en boudin F, suffisamment longs et souples pour que leur couple de torsion soit négligeable.

Vers la partie supérieure, l'axe *a* est muni d'un doigt K, dont l'extrémité peut venir buter contre les vis réglables $K_1$, $K_2$. Ces vis limitent la déviation de la bobine *s* et établissent les connexions nécessaires au renversement du courant dans cette bobine.

Le disque *a*, dont les bords s'engagent dans l'entrefer de l'aimant *m*, constitue l'amortisseur électromagnétique.

Les oscillations de la bobine *s* sont totalisées par une minuterie à chiffres sautants, actionnée par un relais représenté par la figure 59.

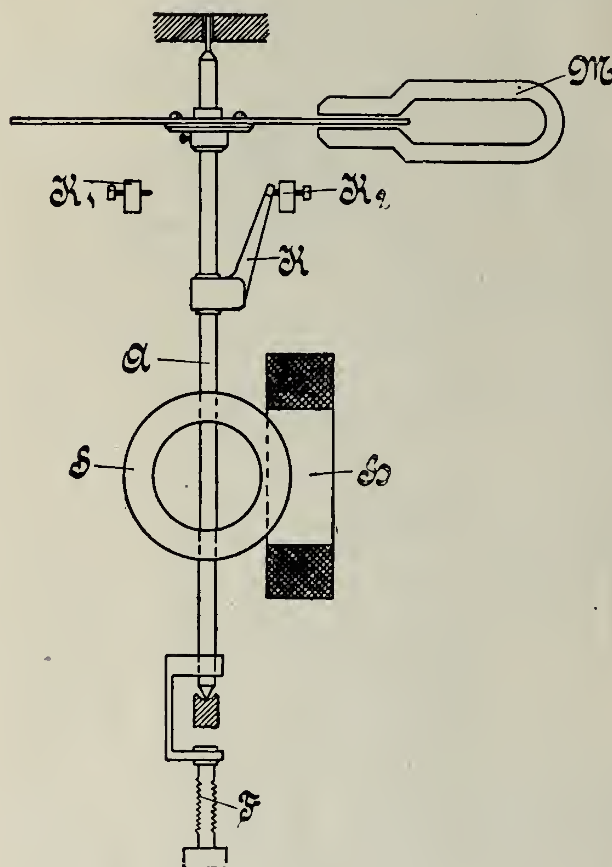
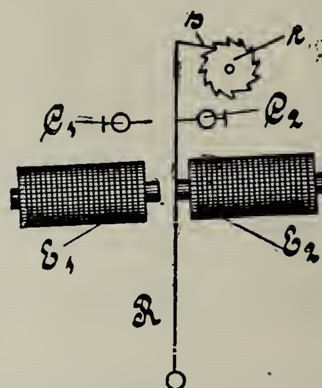


Fig. 58. — Détails du compteur oscillant de l'A. E. G.


Fig. 59. — Relais du compteur oscillant de l'A. E. G.

Ce relais se compose de deux électro-aimants $E_1$, $E_2$, attirant successivement l'armature en fer doux R, dont la course est limitée par deux vis de butée réglables $C_1$, $C_2$, et dont l'extrémité *s*, formant cliquet, actionne le rochet *r* qui commande la minuterie. Un cliquet de retenue, non figuré, empêche tout retour en arrière de la roue à rochet *r*. Les figures schématiques 60*a* à 60*d* vont nous permettre d'expliquer le fonctionnement du mécanisme.

Le courant dérivé traverse successivement l'électro $E_1$, les résistances $W_1$, $W_2$ et l'électro $E_2$.

La bobine mobile S, branchée, d'une part, entre les résistances $W_1$, $W_2$, peut venir, d'autre part, en relation avec les vis $K_1$, $K_2$ (*fig.* 58), directement reliées aux conducteurs + et — de la canalisation.

A cet effet, l'extrémité de la bobine *s* est en communication avec le doigt K et avec l'armature R du relais.

Au repos, les organes occupent les positions que montre la figure 60*a*. Dès que le compteur est en charge, le courant dérivé excite les électros $E_1$, $E_2$, mais l'armature R reste appuyée du côté où elle avait été attirée la dernière fois. En même temps, un courant traverse la bobine S, ce courant étant dérivé entre le contact $C_2$ et les résistances $W_1$, $W_2$.

La bobine S reçoit une impulsion qui la fait dévier, vers la droite, par exemple. A la fin de

la déviation, le doigt R vient toucher la vis $K_2$, ce qui met l'électro $E_2$ et la résistance $W_2$ en court-circuit (*fig.* 60*b*). L'électro $E_1$ reçoit, au contraire, un courant renforcé, par suite de la mise en court-circuit de $E_2$ et de $W_2$. L'armature R est alors brusquement attirée vers la gauche. Les électros $E_1$, $E_2$ sont, à ce moment, tous deux excités ; mais l'armature étant appliquée contre $E_1$ ne peut être attirée par $E_2$. La bobine S est maintenant en parallèle avec la résistance $W_1$ et le courant qui la traverse est inversé (*fig.* 60*b*). L'impulsion se produit vers la gauche jusqu'à ce que, l'électro $E_1$ ayant été mis à son tour en court-circuit, l'électro $E_2$ attire de nouveau l'armature R. C'est alors avec la résistance $W_2$ que la bobine S se trouve en parallèle et le courant s'y inverse de nouveau. Les mêmes phénomènes se continuent ensuite indéfiniment. A chaque oscillation de la bobine S vers la droite ou vers la gauche, correspond une oscillation de l'armature R du relais. Les impulsions de la bobine S se trouvent ainsi totalisées l'une après l'autre et le sens du courant s'inverse dans la bobine S à la fin de chaque impulsion.

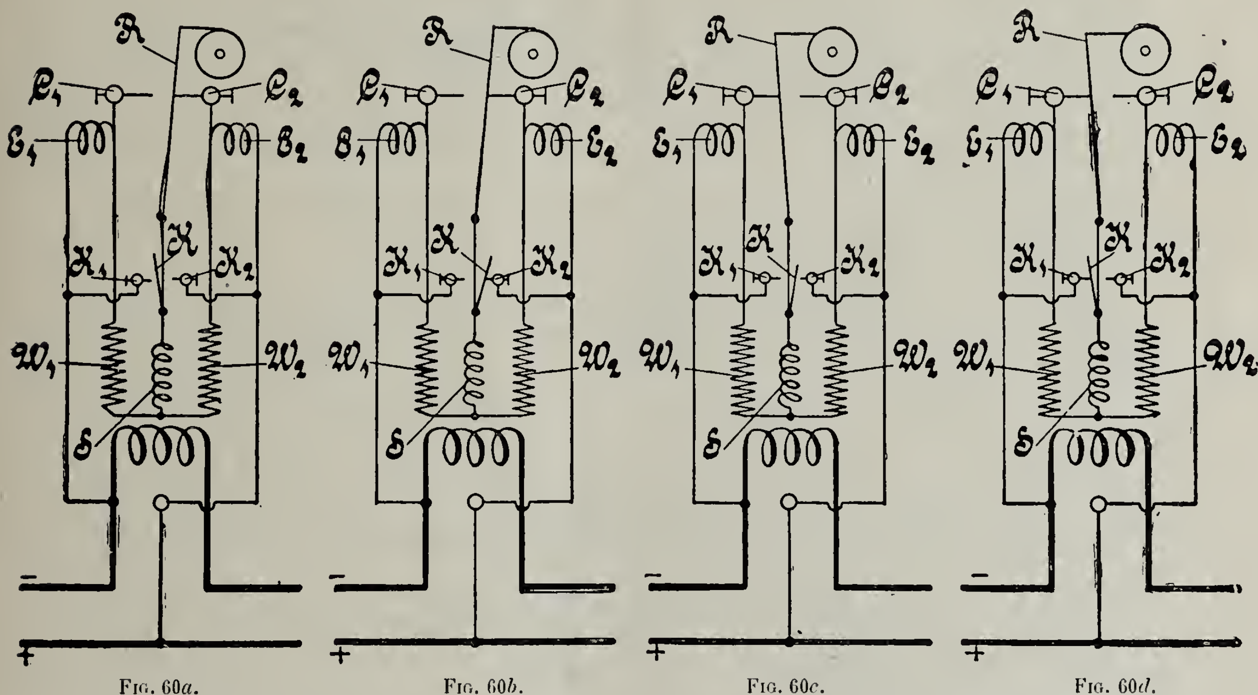



Fig. 60*a*. Fig. 60*b*. Fig. 60*c*. Fig. 60*d*.

On peut remarquer que, grâce à ce dispositif d'inversion, le circuit dérivé n'est jamais coupé. Il n'est que partiellement mis en court-circuit et, par conséquent, il ne se produit jamais d'étincelles entre le doigt K et les contacts $K_1$, $K_2$. Ces contacts restent propres et l'exactitude du compteur ne peut se trouver altérée.

Cet instrument présente l'avantage de ne pas avoir de collecteur. Or on sait que cet organe, quand il est nécessaire, exige un entretien constant. Les lectures sont particulièrement faciles, grâce à l'emploi d'une minuterie à chiffres sautants. De ce chef, les abonnés, même les moins expérimentés, peuvent, sans commettre d'erreur, relever eux-mêmes les indications fournies par l'instrument.

Les indications sont rigoureusement exactes pour une charge de 90 0/0 de la capacité du compteur. Pour les charges inférieures, l'erreur est variable ; mais elle reste toujours inférieure à 2 0/0. Les variations de tension ne modifient pas l'exactitude et la bobine mobile S ne peut osciller pendant la marche à vide.

Elle se met en mouvement quand la charge atteint 1 0/0 du maximum. Au point de vue de l'énergie absorbée par le fonctionnement même de l'instrument, énergie qui, comme on le sait, n'est pas enregistrée, le circuit dérivé exige 1,2 watt par 100 volts. Ce compteur, qui ne peut

être employé que pour le courant continu, se construit pour toutes intensités jusqu'à 10 ampères et pour toutes tensions jusqu'à 250 volts.

Les bornes de connexion sont placées dans une boîte spéciale et sont disposées de manière qu'on puisse facilement brancher un wattmètre pour vérifier l'étalonnage.

Grâce à l'emploi de barettes mobiles, le wattmètre peut être intercalé ou enlevé du circuit sans qu'on soit obligé d'interrompre le service.

### COMPTEURS A INTÉGRATION DISCONTINUE

Dans ces instruments, le système mobile, contrairement à ce qui se produit dans les compteurs oscillants, avance de quantités variables à des intervalles de temps égaux. C'est sur ce principe que sont fondés les *compteurs à intégration discontinue.*

**Compteur Brillié.** — Cet instrument, exposé à titre rétrospectif par la *Compagnie anonyme continentale pour la fabrication des compteurs*, figurait déjà à l'Exposition de 1889. A cette époque, il était l'un des plus perfectionnés ; mais la complication de son mécanisme a fait préférer depuis les compteurs plus simples employés de nos jours.

Nous ne ferons que décrire sommairement cet appareil, connu sous le nom de compteur Brillié à ressort.

Un dispositif recueille à intervalles de temps réguliers l'indication d'un wattmètre et ces indications sont totalisées.

Le compteur Brillié comprend cinq organes principaux :

Le wattmètre à torsion, formé d'une bobine en fil fin branchée en dérivation sur le réseau et mobile sur couteaux à l'intérieur de deux bobines fixes en gros fil, traversées par le courant principal.

Un petit électromoteur fournissant l'énergie nécessaire à la mise en mouvement des divers mécanismes.

Un modérateur servant à tordre aussi progressivement que possible le ressort de la bobine mobile, de façon à ramener celle-ci au zéro sans oscillations.

Une pendule à remontoir d'égalité actionné électriquement et réglant les intervalles d'enregistrement périodique (toutes les minutes).

Un totalisateur dont le premier mobile est entraîné par friction.

On trouvera une description détaillée de ce compteur dans *les Compteurs d'énergie électrique*, par E. Hospitalier (Paris, 1889, G. Masson, éditeur).

**Compteur Siemens et Halske.** — Ce compteur se construit soit comme ampères-heure-mètre, soit comme watts-heure-mètre :

Suivant les cas, il se compose donc d'un ampèremètre ou d'un wattmètre dont l'aiguille se déplace devant les divisions d'un cadran. Toutes les 3,75 secondes, l'aiguille est ramenée au zéro de la graduation et un rouage totalisateur additionne les angles successifs que fait l'aiguille avec ce zéro.

Voici en quoi consiste le mécanisme : Un mouvement d'horlogerie réglé par un balancier de montre, avec échappement à ancre, est entretenu électriquement comme dans un compteur horaire. Une des roues de ce mouvement porte un cliquet tournant normalement très près du premier mobile du totalisateur.

Lorsque l'aiguille de l'instrument rencontre ce cliquet, elle le met en prise avec ce premier mobile et l'enregistrement se produit.

L'aiguille est ainsi peu à peu ramenée au zéro pendant que le totalisateur fonctionne. A la fin, l'aiguille est arrêtée par une butée et le cliquet échappe à ce moment. L'aiguille reprend alors sa liberté, le cliquet vient repasser près d'elle et se remet en prise. Les mêmes phénomènes se reproduisent ensuite de la même manière, chaque cycle complet durant 3,75 secondes, ainsi qu'il a été dit ; cette durée est celle que la roue porte-cliquet met pour effectuer un tour complet.

Sous 100 volts, ce compteur absorbe 1 watt pour assurer le fonctionnement du rouage et du totalisateur. Les indications sont exactes à 2 0/0 près.

**Compteur Holden.** — Le compteur de M. F. Holden, exposé par M. Garfield, est à intégration discontinue.

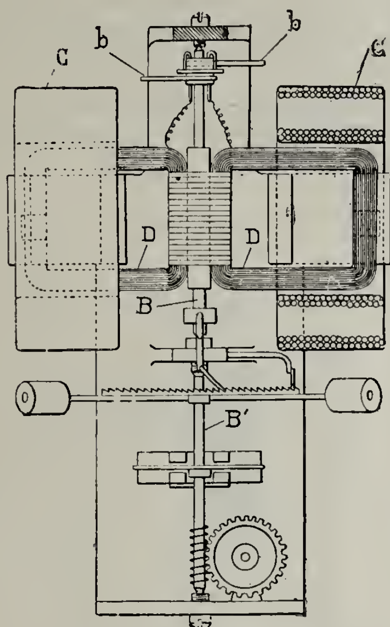


Fig. 61. — Compteur Holden. Détails de construction.

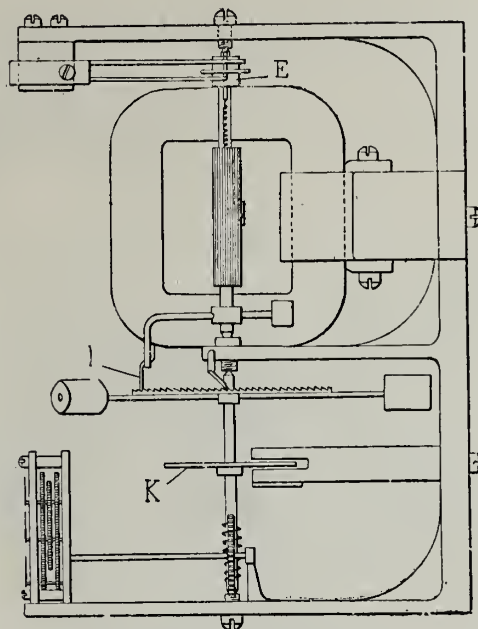


Fig. 62. — Compteur Holden. Détails de construction.

Cet instrument est constitué par un électrodynamomètre comportant deux bobines fixes C, C (*fig.* 61) intercalées dans le circuit principal et deux bobines mobiles D, D en dérivation sur le réseau. Ces bobines ont leurs enroulements disposés de manière à annuler l'influence du champ magnétique terrestre aussi bien que celle d'un champ magnétique voisin ; elles forment un système astatique.

Les bobines mobiles D, D sont montées sur un arbre vertical B reposant sur des pivots et l'amplitude des déplacements angulaires de cet équipage mobile est limitée par des butées *d*, *d*.

Une bague, en matière isolante E (*fig.* 62), est fixée sur l'arbre B au-dessus des bobines D, D. Sur cette bague viennent partiellement s'enrouler deux lames métalliques *b*, *b* ayant chacune une de leurs extrémités fixée respectivement à l'une des bobines mobiles D, D, l'autre extrémité se terminant par un ressort F (*fig.* 64), dont on règle la tension à l'aide d'une vis G. Ce dispositif permet de faire varier dans d'assez grandes limites le couple de torsion de l'équipage mobile. Un cliquet mobile I, fixé sur l'arbre B, sert à entraîner cet équipage constitué par un second arbre vertical B′ placé dans le prolongement du premier et à sa partie inférieure. Cet arbre B′ est muni de trois bras horizontaux filetés disposés dans un même plan et portant chacun un contrepoids réglable servant à équilibrer l'instrument. Ces bras portent, en outre, un cercle denté en prise avec le cliquet d'entraînement, disposition qui permet

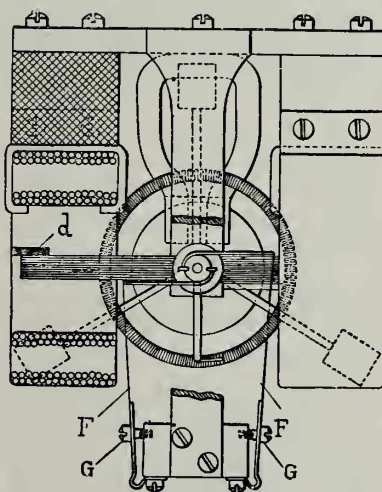


Fig. 63. — Compteur Holden. Détails de construction.

de donner aux organes un moment d'inertie considérable par rapport à leur masse. Au-dessous de ces bras horizontaux, l'arbre B′ porte un disque en fonte K, qui tourne entre les pôles à grande surface d'un aimant permanent exerçant sur ce disque, du fait de l'hystérésis, un effort constant. Enfin, l'extrémité inférieure de cet arbre, filetée et formant vis sans fin, commande le mécanisme enregistreur.

Le faible poids des organes, portant sur les deux pivots, permet de transporter le compteur sans qu'il soit nécessaire de soulever l'équipage mobile ; on évite ainsi l'obligation d'étalonner à nouveau l'instrument, chaque fois qu'on l'a déplacé.

Les bobines en dérivation de l'électrodynamomètre sont périodiquement mises en circuit par un mouvement d'horlogerie à commande électrique ; les bobines fixes sont parcourues par le courant principal à la manière ordinaire.

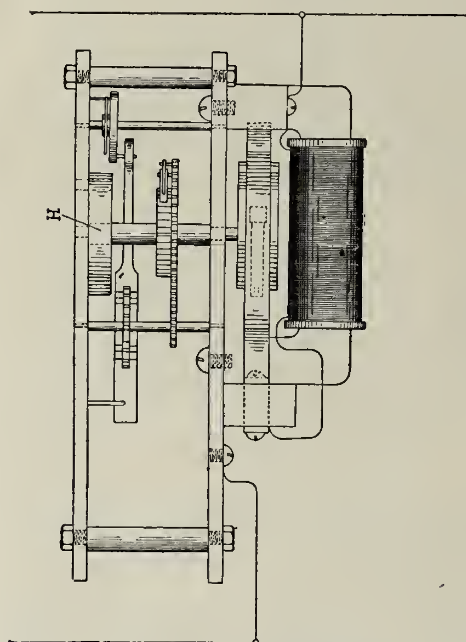



Fig. 64. — Compteur Holden.
Détails du mouvement d'horlogerie.

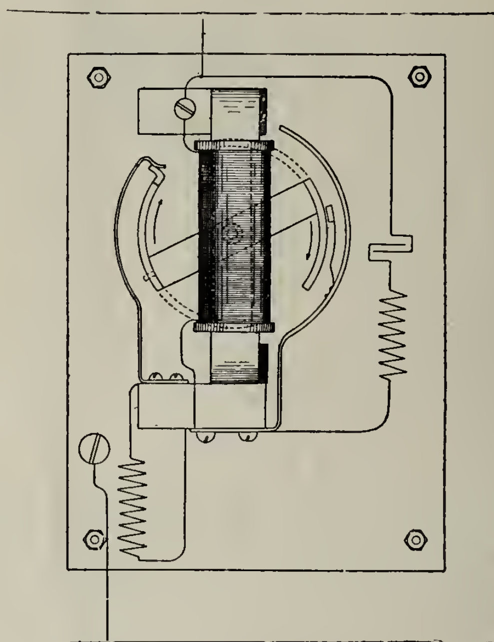


Fig. 65. — Compteur Holden.
Détails du mouvement d'horlogerie.

Indépendamment de l'électrodynamomètre, le compteur comporte un mouvement d'horlogerie et un mécanisme de remontage automatique.

Le mouvement d'horlogerie (*fig.* 65 et 66) est constitué par un ressort ou par un poids moteur actionnant, par l'intermédiaire de pignons et de roues dentées, le système d'échappement.

Le mécanisme de remontage comporte un dispositif électromagnétique pour armer le ressort du mouvement d'horlogerie ou pour remonter le poids qui le remplace et des contacts fermant ou ouvrant le circuit électrique de ce moteur oscillant et celui des bobines mobiles de l'électrodynamomètre à des intervalles de temps fixés d'avance.

Le fonctionnement de ce moteur est basé sur le principe des impulsions électrodynamiques périodiques imprimées à des bobines mobiles par un système de bobines fixes. Ces impulsions fournissent à un équipage mobile autour d'un axe vertical une certaine quantité d'énergie cinétique dissipée par hystérésis dans le disque de fer tournant entre les pôles de l'aimant permanent. L'angle décrit par l'équipage mobile avant son arrêt est d'autant plus grand que l'impulsion a été elle-même plus grande. En proportionnant convenablement les organes, l'angle décrit par cet équipage mobile est rendu proportionnel à la puissance consommée à l'instant où se produit chaque impulsion périodique. Les angles décrits sont totalisés par une minuterie qui donne, par conséquent, la quantité totale d'énergie.

Voici comment fonctionne le compteur Holden : Chaque fermeture du circuit des bobines en dérivation de l'électrodynamomètre entraîne une réaction entre les bobines fixes et mobiles et produit une déviation de ces dernières surmontant le couple résistant dû aux ressorts et à l'hystérésis du disque de fonte ; ce déplacement se produit jusqu'à ce qu'une plaque de butée *d* arrête les bobines mobiles. Pendant ce déplacement, le cliquet I que porte l'arbre B entraîne l'équipage inférieur qui, d'abord, suit le mouvement des bobines D, D et continue, ensuite, à tourner jusqu'à complète consommation de l'énergie cinétique qui lui a été fournie, énergie transformée en chaleur par l'hystérésis du disque de fonte.

Les bobines mobiles de l'électrodynamomètre dévient toujours du même angle quelle que soit la charge. Il est évident que le couple exercé par les bobines fixes sur les bobines mobiles doit, pour produire un mouvement de l'équipage, avoir une valeur supérieure à celle des couples

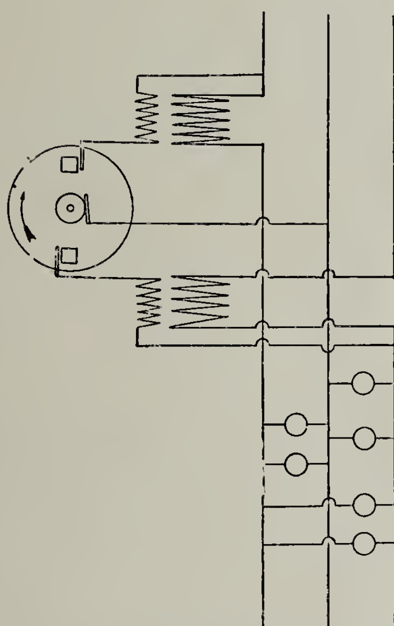


Fig. 66. — Compteur Holden. — Connexions pour une distribution à courants triphasés.

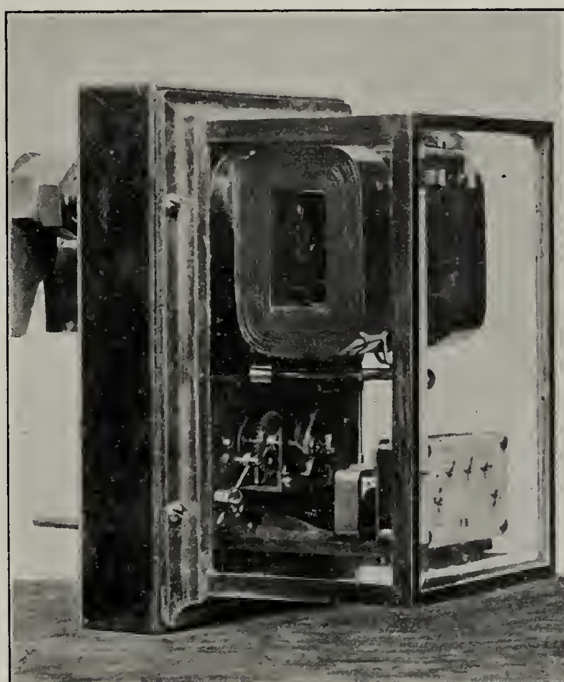


Fig. 67. — Compteur Holden, type de 100 kilowatts pour tableau de distribution.

dus aux ressorts et à l'hystérésis. En établissant une certaine relation entre les couples moyens dus respectivement aux ressorts et à l'hystérésis, le déplacement total élémentaire de l'équipage inférieur est proportionnel à la puissance consommée au moment de l'observation.

La précision du compteur est indépendante de la charge, car la courbe représentant le rapport des watts aux angles de rotation de la partie inférieure est linéaire à partir du point où le compteur commence à fonctionner.

La résistance des bobines en dérivation d'un compteur de 500 watts sous 100 volts est d'environ 1 000 ohms, de sorte qu'en fermant le circuit toutes les minutes pendant 1,5 seconde, temps suffisant pour obtenir une déviation angulaire totale des bobines, la perte moyenne dans celles-ci n'est que de 0,25 watt. On peut encore réduire cette perte de moitié en ne fermant le circuit que toutes les deux minutes, ce qui assure encore une exactitude bien suffisante sur tous les circuits d'éclairage.

Par une modification de construction très simple, que montre la figure 66, on peut utiliser ce compteur sur les circuits triphasés. Les bobines correspondantes, en série ou en dérivation, doivent être électrodynamiquement égales et les deux bobines fixes être suffisamment écartées

pour ne donner lieu à aucune influence mutuelle. On peut tenir compte des variations du facteur de puissance du circuit en proportionnant convenablement l'électrodynamomètre.

Les variations ordinaires de température sont pratiquement sans effet sur la précision du compteur.

La constante de temps du circuit en dérivation est si faible que les lectures du compteur sont indépendantes de la fréquence.

La méthode d'étalonnage est fort simple. Une expérience permet de déterminer la tension du ressort d'après la rapidité avec laquelle les bobines sont renvoyées à leur position initiale. En faisant varier le shunt magnétique de l'aimant permanent, on règle l'amortissement de manière à amener le disque au repos au bout de deux tours ou de toute autre déviation convenable. On fait les lectures à une charge donnée, 5 0/0 de la pleine charge par exemple, les ressorts étant réglés de manière que 10 impulsions fassent faire au disque un tour complet, ou 5 impulsions un demi-tour, ou encore toute autre fraction de la déviation totale correspondant à la pleine charge, tout en ayant une tension suffisante pour produire le renvoi des bobines mobiles à leur position initiale. Les ressorts ont une si faible influence sur les lectures, lors de la pleine charge, que l'étalonnage pour de fortes charges est parfaitement inutile.

Dans le modèle de compteur Holden de 500 watts, la déviation à enregistrer à pleine charge est d'environ 250 mm, de sorte qu'avec 20 watts, soit 4 0/0 de la charge totale, la déviation est de 10 mm, ce qui assure une grande précision de la mesure. Les modèles de grande puissance commencent à donner des indications précises à partir de 1 0/0 environ de la pleine charge. La déviation correspondant à la pleine charge dans un compteur de 100 kw est de 635 mm.

La figure 67 montre l'aspect extérieur d'un compteur de 100 kw pour tableau de distribution.

---

IV

# COMPTEURS SPÉCIAUX

Dans la catégorie des compteurs spéciaux, il faut comprendre :

1° Les *compteurs à prépaiement ;*

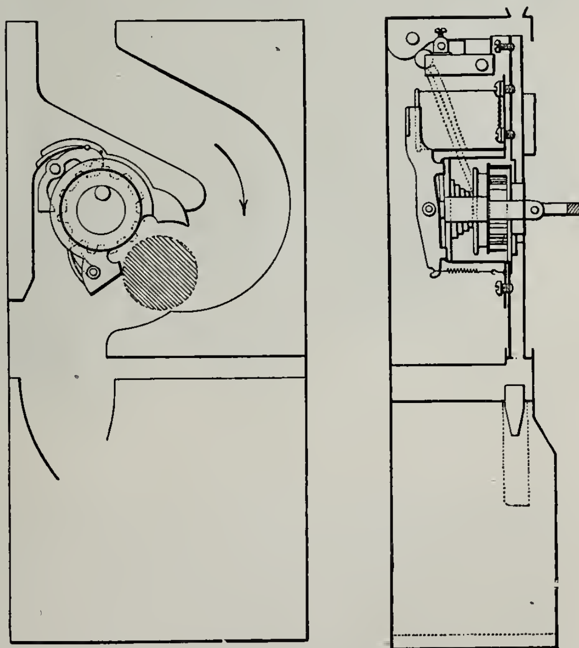
2° Les *compteurs à double tarif;*

3° Les *compteurs à tarif variable.*

### 1° COMPTEURS A PRÉPAIEMENT

Deux compteurs de ce genre figuraient à l'Exposition : le compteur Thomson, exposé par la *Compagnie pour la fabrication des compteurs*, et le compteur Vulcain, exposé par la *Compagnie anonyme continentale.*

**Compteur Thomson.** — En principe, ce compteur se compose d'un compteur Thomson ordinaire, auquel on adjoint un mécanisme spécial dit de prépaiement. Ce mécanisme a pour objet de fermer le circuit de l'abonné, puis de permettre à l'induit du compteur d'exécuter un certain nombre de tours. A la fin du dernier tour permis, l'énergie payée d'avance est consommée et le circuit de l'abonné s'ouvre automatiquement. La figure 68 montre en quoi consiste le mécanisme de prépaiement :


Fig. 68. — Mécanisme de prépaiement du compteur Thomson.

Lorsqu'on introduit une pièce de monnaie dans l'ouverture ménagée à cet effet, elle tombe dans un conduit et vient occuper la position figurée en pointillé.

On fait alors tourner à la main, de gauche à droite, une manette disposée extérieurement; cette manœuvre a pour objet de remonter le mécanisme, la pièce servant de pêne à cette sorte de clé de serrure.

Une fois le remontage effectué, le circuit de l'abonné se trouve fermé par un interrupteur actionné par la manette extérieure. La pièce de monnaie se dégage alors et est recueillie dans un tiroir-caisse.

L'abonné consommant l'énergie, le compteur se met en marche et l'induit, en tournant, fait défiler le rouage de prépaiement dont le ressort a été armé au moment du remontage.

Lorsque le nombre de tours que doit effectuer le moteur du compteur est terminé, le mécanisme de prépaiement est déclenché et tout revient dans la position primitive.

On peut faire pénétrer successivement plusieurs pièces de monnaie dans l'appareil, ce qui permet d'armer d'autant plus son ressort et de dépenser une plus grande quantité d'énergie avant l'interruption du courant.

Un cadran indique d'ailleurs constamment à l'abonné à quel moment il en est de sa dépense d'énergie et ce qui lui reste de disponible. Des cliquets convenablement disposés empêchent toute fraude; le nombre de pièces introduites dans l'appareil est enregistré par un cadran spécial. Lorsque l'on vient faire la recette, il est facile de constater, en présence de l'abonné, si les pièces qu'il a introduites ont réellement leur valeur.

**Compteur Vulcain.** — Ce compteur était exposé par la *Compagnie anonyme continentale pour la fabrication des compteurs à gaz et autres appareils.* Comme le montre la figure 69, cet instrument se compose d'un mécanisme de prépaiement adjoint à un compteur Vulcain ordinaire.

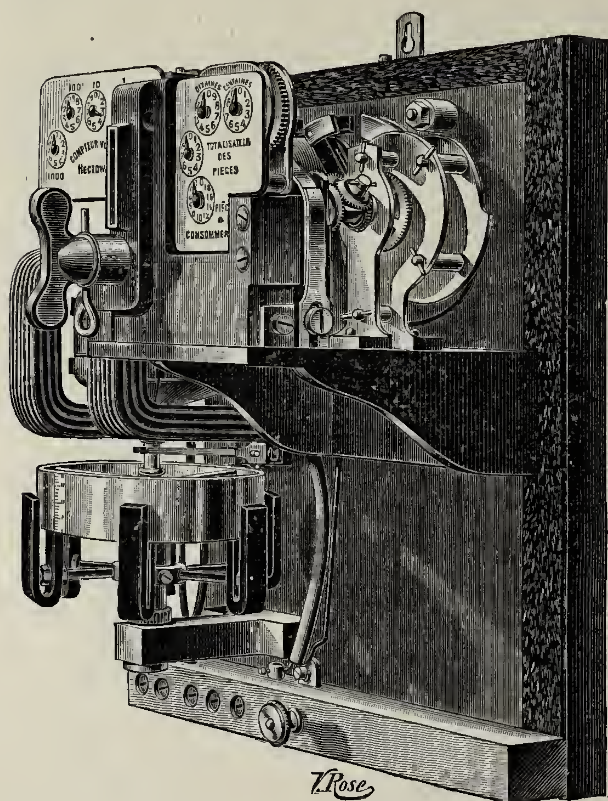



Fig. 69. — Compteur Vulcain à prépaiement.

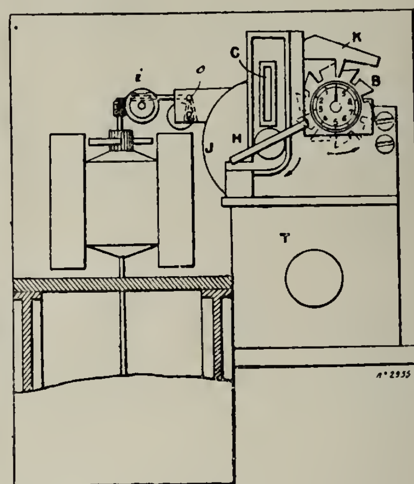



Fig. 70.

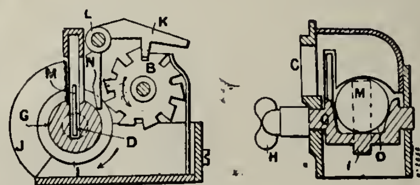



Fig. 71 et 72.

On fait fonctionner le mécanisme de prépaiement en introduisant une pièce de monnaie dans la fente C (*fig.* 70) et en tournant la clé H de gauche à droite.

Ce mouvement forme un interrupteur et l'abonné dispose du courant; en même temps, un ressort relié à l'axe de la roue à rochet B se trouve armé.

Dès que la pièce est tombée dans le tiroir-caisse, le mécanisme de prépaiement tend à tourner sous l'action du ressort agissant sur B. Le défilage du mobile de plus grande vitesse de ce rouage est réglé par un échappement à chevilles *cfg* (*fig.* 73), le défilage ne pouvant se produire que lorsque l'abonné se sert du courant. Le ressort se détend progressivement alors et, finalement, l'interrupteur s'ouvre.

On peut mettre jusqu'à 19 pièces successivement dans l'appareil. A chaque introduction d'une pièce, on tourne la clé H. Celle-ci peut tourner d'un vingtième de tour après chaque chute d'une pièce dans le tiroir-caisse.

La tension donnée ainsi au ressort est proportionnelle au nombre des pièces et il en sera de même de la quantité d'énergie que pourra débiter l'appareil. Un cadran spécial indique à l'abonné ce qui lui reste à consommer avant l'obligation de remettre de nouvelles pièces de monnaie.

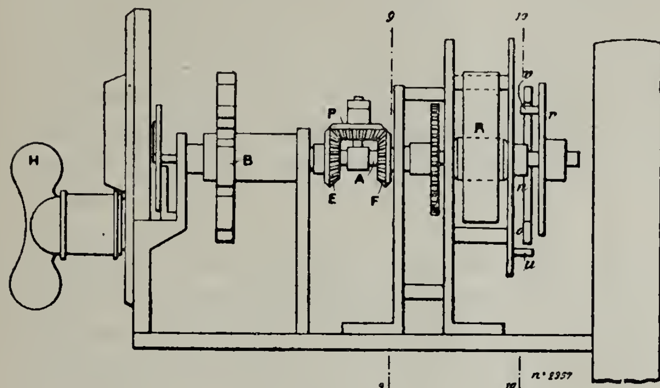


Fig. 73.

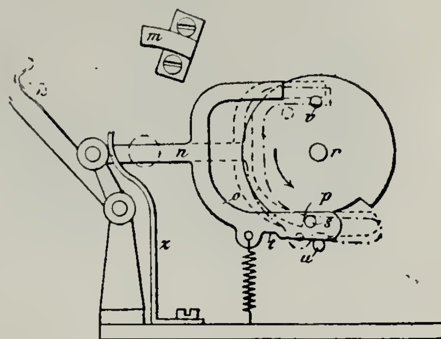


Fig. 74.

Les figures 71 à 76 montrent le détail des divers organes. La pièce M, introduite en H, est engagée dans l'entaille du boisseau G de la clé.

Cette pièce engrène avec la roue B et permet sa rotation d'un vingtième de tour, après avoir dégagé cette roue de son cliquet NLK. L'action de la roue B se transmet au mécanisme par l'intermédiaire d'un différentiel (*fig.* 73). Cet organe est nécessaire pour permettre d'armer le ressort de B, lorsque le compteur n'est pas encore en marche.

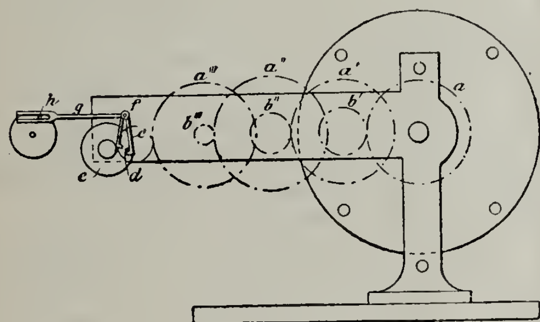


Fig. 75.

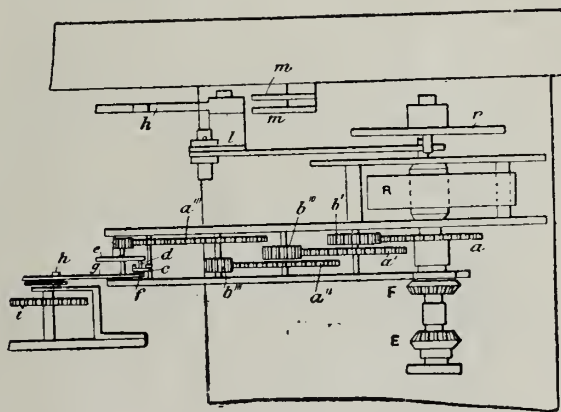


Fig. 76.

Lorsque l'abonné consomme l'énergie qu'il a ainsi payée d'avance, le compteur fonctionne et le premier mobile *e* du totalisateur (*fig.* 75 et 76) fait osciller à chaque tour la fourchette *fg*. Le mobile de plus grande vitesse du mécanisme de prépaiement effectue aussi un tour pendant le même temps, grâce à la goupille *h* qui reste toujours engagée dans la fourchette *fg*.

Lorsque toute l'énergie à laquelle l'abonné a droit est consommée, la roue mobile *e* a exécuté le nombre de tours correspondant à cette énergie.

Il en est de même du mobile de plus grande vitesse du mécanisme de prépaiement et, finalement, le ressort agissant sur la roue B se trouve désarmé.

Naturellement, un système de cliquets empêche tout retour en arrière et un compte-pièces indique à chaque instant quelle recette on doit trouver dans le tiroir-caisse.

Ce compteur, étant destiné à des abonnés ne consommant que peu d'énergie à la fois, a été seulement établi pour des capacités jusqu'à 300 watts sous 110 volts.

### 2° COMPTEURS A DOUBLE TARIF

**Emploi.** — Les courbes représentant la puissance électrique fournie au réseau de distribution d'une grande ville ont une allure bien connue.

Pendant la majeure partie du temps, la consommation est faible ; elle augmente brusquement entre quatre heures et huit heures du soir, principalement en hiver ; l'été, les variations sont moins accentuées. Toutefois, dans les deux cas, la consommation moyenne est toujours très faible relativement à la puissance maximum de l'usine génératrice. Cette disproportion entre la puissance maximum et la consommation moyenne se produit également dans les distributions de gaz d'éclairage.

Dans les usines à gaz, le gazomètre joue exactement le rôle d'un accumulateur parfait, ce qui permet d'établir une usine à gaz en vue de la puissance moyenne à fournir, son matériel fonctionnant constamment à pleine charge. Il n'en est pas ainsi pour une station génératrice d'énergie électrique, car l'accumulateur est loin d'être aussi parfait que le gazomètre ; à égalité d'énergie emmagasinée, il coûte vingt fois plus de frais de premier établissement que le gazomètre ; en outre, son entretien est très onéreux et son rendement peu élevé.

Il s'ensuit que les stations génératrices électriques, même lorsqu'elles utilisent des accumulateurs, doivent avoir un matériel générateur permettant d'alimenter le réseau de distribution à pleine charge. D'après des statistiques soigneusement établies, on peut admettre que la production moyenne annuelle d'une station centrale ne représente environ que 6 à 7 0/0 de sa capacité maximum.

On conçoit, dans ces conditions, que le prix de revient du kilowatt-heure soit relativement très élevé, à cause des frais généraux qui sont proportionnels à la puissance maximum de la station génératrice.

Une seule solution permet de diminuer ce prix de revient : c'est de vendre l'énergie électrique à des tarifs variables suivant les heures de consommation, c'est-à-dire d'établir un prix de vente plus bas aux heures de faible consommation qu'aux heures où la station fonctionne à pleine charge. Les consommateurs sont ainsi amenés à modifier leurs horaires de consommation et à profiter, pour utiliser l'énergie électrique qui leur est nécessaire, des heures où elle est vendue moins cher. Les stations centrales pourront ainsi relever leur moyenne de puissance consommée et arriver, par suite, à obtenir un prix de revient plus bas du kilowatt-heure.

Les résultats obtenus dans cette voie par plusieurs stations centrales sont remarquablement encourageants. C'est précisément pour mettre en pratique ce mode d'exploitation que l'on a été amené à créer les compteurs à tarifs variables.

Les uns sont disposés pour fonctionner à deux tarifs suivant des horaires fixés à l'avance ; ils ne constituent qu'une solution partielle du problème, solution qui, le plus souvent, est largement suffisante.

Les compteurs de ce genre qui figuraient à l'Exposition sont ceux de la Compagnie pour la fabrication des compteurs, de la Société Aron et de la Compagnie Schuckert.

**Compteur Thomson à double tarif.** — Cet instrument était exposé par la *Compagnie pour la fabrication des compteurs*. Il se compose d'un compteur Thomson ordinaire, muni de deux séries de cadrans totalisateurs, une série pour chaque tarif. La vis sans fin du moteur du compteur actionne une pièce intermédiaire commandée par l'armature d'un électro-aimant.

Lorsque cette armature est attirée, la vis sans fin engrène avec le totalisateur de droite ; elle agit, au contraire, sur le totalisateur de gauche lorsque l'armature est écartée.

Une horloge spéciale (*fig.* 77) émet pendant le temps voulu le faible courant nécessaire

pour actionner l'électro-aimant. Les heures pendant lesquelles l'un ou l'autre tarif est appliqué peuvent être modifiées par le représentant de la station.

Il agit à cet effet sur les aiguilles de l'horloge en les amenant sur les heures où un tarif doit commencer et terminer.

Ces aiguilles restent à la position qui leur a été donnée, l'une sur le demi-cadran supérieur, l'autre sur le demi-cadran inférieur. Ces demi-cadrans correspondent aux douze heures de jour et de nuit.

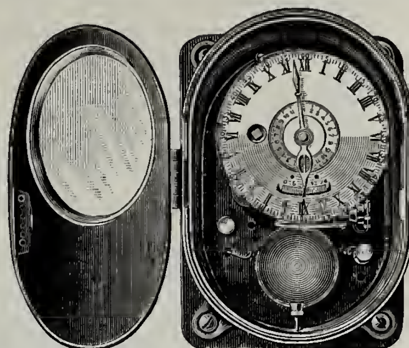


Fig. 77. — Horloge du compteur Thomson à double tarif.

Dans une autre disposition, l'horloge intercale dans le circuit dérivé du compteur une résistance additionnelle pendant le temps où le tarif réduit est applicable.

Le compteur n'a plus alors qu'une seule série de cadrans. Ses indications sont rendues de la sorte inférieures à la consommation réelle, suivant la valeur de la résistance additionnelle, valeur réglée d'avance une fois pour toutes.

Enfin, on peut également employer des compteurs distincts, l'horloge faisant fonctionner l'un ou l'autre.

**Compteur Aron à double tarif.** — Comme le montre la figure 78, le compteur Aron à double tarif se compose d'une caisse vitrée à deux compartiments.

Dans le compartiment de droite se trouve un compteur Aron ordinaire à remontage électro-automatique. Le totalisateur simple est remplacé par un totalisateur double, comprenant deux séries de cadrans I et II.

La série I correspond au tarif normal et la série II au tarif réduit.

Un long index visible au bas du cadran montre constamment si c'est la série I ou la série II qui enregistre.

Dans le compartiment de gauche se trouve une horloge de précision, comportant quelques organes spéciaux, dont le rôle est précisément de modifier l'enregistrement du compteur et de produire le changement de tarif.

Une simple bielle réunit l'horloge au compteur; elle traverse la cloison qui sépare les deux parties de l'instrument. La figure 78 montre, en outre, comment le compteur à double tarif doit être relié au réseau de distribution. La figure 79 représente l'ensemble du mécanisme de l'horloge et le double système de cadrans totalisateurs. F est la roue directement menée par le planétaire du compteur; elle tourne donc proportionnellement à la puissance mesurée par le compteur et engrène avec deux roues de renvoi E, G. Les roues sont montées dans une cage DC qui peut basculer autour du point C, axe de la roue F.

J et K sont les premiers mobiles des totalisateurs I et II. Lorsque la roue E est en prise avec J (comme c'est le cas montré par la figure 80), l'enregistrement se produit sur les cadrans de gauche (tarif normal).

Au contraire, l'enregistrement se produit sur les cadrans de droite (tarif réduit) lorsque ce sont les roues G et K qui se trouvent en prise.

La bascule D est conduite par une lame élastique B qui reçoit un mouvement à gauche ou à droite, mouvement que lui communique la bielle *y*. Cette bielle s'articule à la lame B au moyen d'un coulisseau A qui commande en même temps l'assiette N de l'index du tarif en vigueur.

En nous reportant à gauche de la figure 79, C est la roue des heures (roue de centre) de l'horloge.

Le petit cadran placé en haut et à droite (*fig.* 78) est celui des secondes; celui situé à sa gauche indique si les heures marquées par le cadran principal sont des heures de jour (partie

blanche, de six heures du matin à six heures du soir) ou des heures de nuit (partie noire, de six heures du soir à six heures du matin).

Les cadrans A, B sont les cadrans *réveilleurs*. Ils sont divisés en vingt-quatre heures, avec heures de nuit situées à la partie inférieure (noire) des cadrans.

O, O′ (*fig.* 79) sont les aiguilles dites de *rosette*, que l'on déplace au doigt devant ces cadrans.

L'aiguille O est mise à l'heure à laquelle on désire que commence le tarif normal et l'aiguille O′ à l'heure à laquelle ce tarif doit se terminer. Au moment de mettre aux heures les aiguilles O, O′, on s'assure que l'horloge est bien à l'heure et on a soin de ne pas confondre les heures de jour avec les heures de nuit.

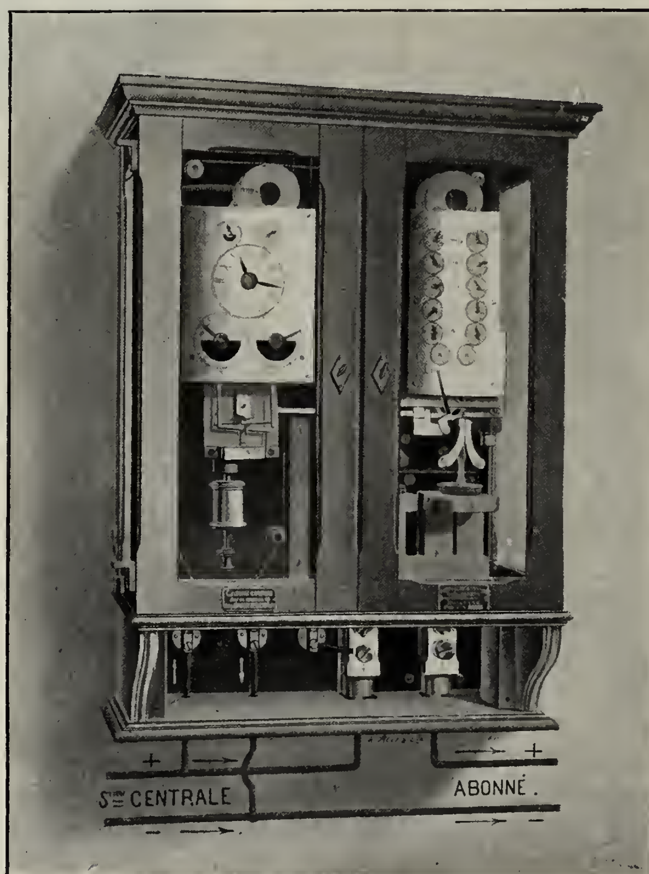



Fig. 78. — Compteur Aron à double tarif.

Les roues $g$, $g'$ font exactement un tour en vingt-quatre heures.

Considérons la roue $g$ (*fig.* 80) ; elle est montée sur un canon $m$ découpé en hélice et portant une entaille $m$.

L'aiguille de rosette $o$ est montée sur un canon $h$ muni d'un talon $n$. Quand le talon est exactement en regard de l'entaille $m$, la roue $g$, comprimée par le ressort en boudin $p$, est vivement poussée vers la droite.

Il en est de même de l'extrémité supérieure du levier $l$ articulé en $r$, tandis que le doigt qui termine ce levier vient frapper une des ailes d'un T (sens de la flèche 3, *fig.* 80). Le T étant mobile autour de son axe $t$, l'extrémité $u'$ du bras $u$ est chassée vers la gauche ; il en est de même pour la bielle $g$ (*fig.* 81) articulée en $u'$. La cage D bascule comme il a été dit et les roues E, J viennent en prise.

Le contraire se produit quand c'est la roue $g'$ qui est repoussée par le ressort $p'$, lorsque le

talon $n'$ de l'aiguille $o'$ se trouve en face de l'entaille $m'$ du canon de la roue $g'$. C'est alors la roue G qui vient se mettre en prise avec le premier mobile K du totalisateur II et le changement de tarif se produit. Le temps qui sépare les chutes des talons $n$ et $n'$ est égal à celui pendant lequel le tarif normal doit être appliqué. Il est déterminé par les positions données aux aiguilles de rosette $o$, $o'$, aiguilles qui, une fois mises à l'heure, restent immobiles.

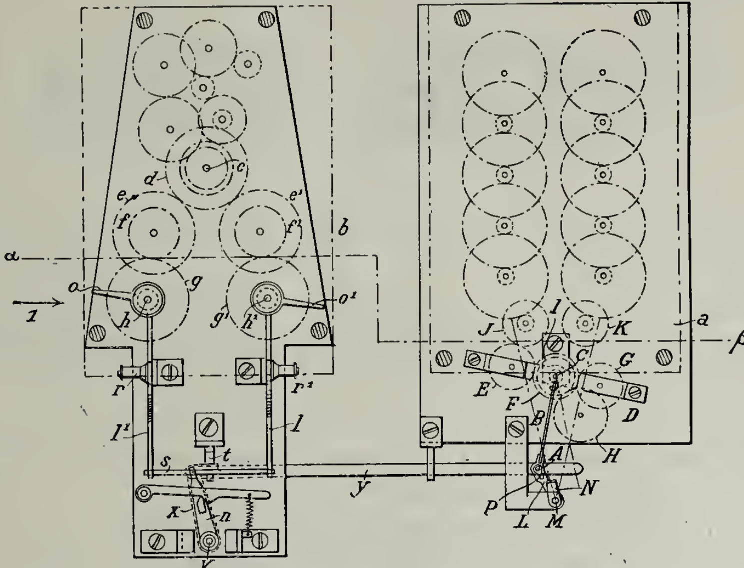


Fig. 79.

Il est à remarquer que l'impulsion à donner aux organes des changements de tarif est fournie par les ressorts $p$, $p'$. Ces ressorts se trouvent réarmés progressivement, après leur détente, par le mouvement des roues $g$, $g'$ qui se continue toujours. Les talons $n$, $n'$ repoussent peu à peu les canons des roues $g$, $g'$ en frottant sur le plan incliné formé par l'hélice de ces canons. De cette manière, l'opération consistant à armer les ressorts $p$, $p'$ dure un certain nombre d'heures et les frottements qui en résultent n'affectent pas la régularité de l'horloge.

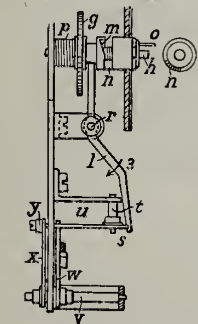


Fig. 80. — Détail d'une roue du réveilleur.

Les roues $g$, $g'$ se déplaçant parallèlement à elles-mêmes, en même temps qu'elles tournent, il est nécessaire que les roues $f$, $f'$ qui les conduisent soient assez épaisses pour que l'engrènement ne cesse de se produire.

Pendant que les ressorts $p$, $p'$ s'arment, les frappeurs des leviers $l$, $l'$ reculent; c'est pour qu'il n'en résulte pas de déplacement intempestif du T que ces frappeurs ont été laissés libres.

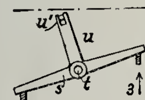


Fig. 81. — Équerre commandant la bielle du changement de tarif.

Afin que la bielle $y$ soit obligée de rester parfaitement à ses fonds de course et que les roues E ou G ne puissent se dégager à faux, cette bielle s'attache, en outre, à un petit levier $n$ articulé en $v$ et qui porte une butée $x$.

Pendant les déplacements de la bielle $y$, la butée $x$ en suit les mouvements. Elle est chassée et maintenue à ses fonds de course par l'épaulement d'un levier horizontal constamment rappelé vers le bas par un petit ressort en boudin.

La figure 82 montre une coupe par la ligne brisée $\alpha\beta$ des organes de la figure 79 qui intéressent le changement de tarif.

En définitive, la commutation mécanique qui provoque le changement de tarif dans le compteur Aron est produite par la détente de roues identiques au réveilleur d'un réveil-matin; les détentes sont fonction des positions données aux aiguilles de tarifs.

Le changement de tarif se produit à coup sûr pour toutes positions données aux aiguilles *o*, *o'*, à condition que la différence d'heure qu'elles indiquent soit supérieure à dix minutes.

C'est bien plus qu'il n'en faut dans la pratique, l'application d'un tarif n'étant jamais aussi courte.

Pour mettre ce compteur en service, il suffit de le placer bien verticalement ; un fil à plomb est, à cet effet, installé sur le côté gauche de la boîte vitrée.

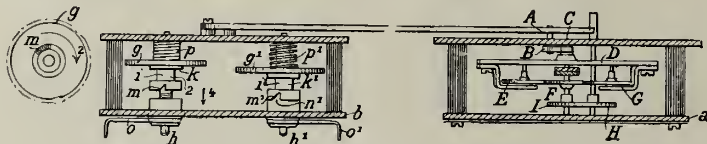



Fig. 82.

Les connexions étant établies et le courant passant dans le compteur, on donne une légère impulsion au balancier de l'horloge.

Les aiguilles du cadran principal sont mises à l'heure et celles des réveilleurs amenées aux positions qui correspondent aux changements de tarifs. Il ne reste plus qu'à plomber l'instrument, l'abonné n'étant pas autorisé, bien entendu, à modifier les positions des aiguilles des réveilleurs[1]

**Compteur Schuckert à double tarif.** — Ce compteur est un ensemble constitué par la réunion d'un compteur ordinaire et d'une horloge spéciale (*fig.* 83).

Le compteur est muni de deux séries de cadrans. L'une correspond à un tarif N et totalise exclusivement l'énergie qui doit être payée à ce tarif. L'autre correspond de même au tarif R. Un embrayage, actionné par l'horloge spéciale, met en relation l'arbre moteur du compteur, tantôt avec le premier mobile des cadrans supérieurs (tarif N), tantôt avec

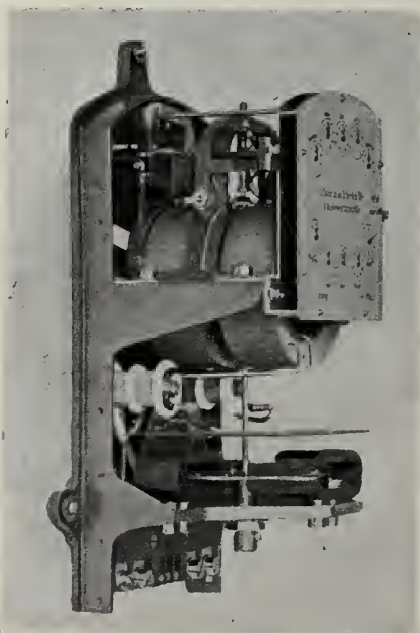


Fig. 83. — Compteur Schuckert à double tarif.

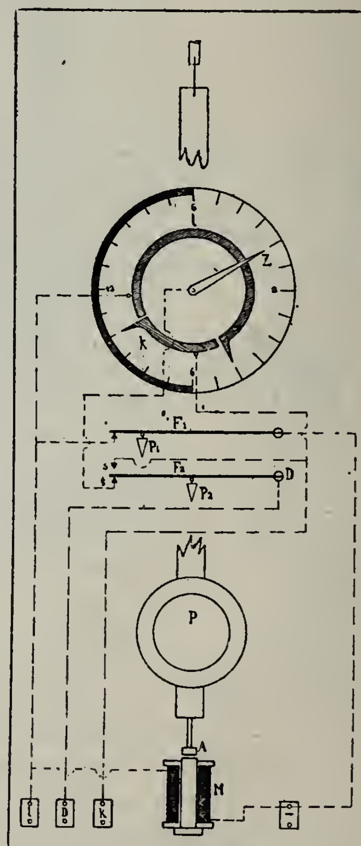



Fig. 84.

celui des cadrans inférieurs (tarif R). En dehors de ce dispositif, sur lequel nous allons revenir, le compteur ne présente rien de particulier.

L'horloge, du système Hipp, a un pendule dont les oscillations sont entretenues électriquement par un courant dérivé du réseau et agissant au moyen d'un électro placé sous le pendule. La figure 84 schématique permet de se rendre compte du fonctionnement de cette horloge.

Une fois le pendule lancé, un butoir qu'il porte vient soulever le taquet $P_1$ et le ressort $F_1$. L'électro-aimant M, qui était en court-circuit, se trouve intercalé dans le circuit WAERM (*fig.* 85); il est excité et donne une impulsion au pendule; le même phénomène se reproduit ensuite à chaque oscillation.

Le cadran de l'horloge est divisé en deux groupes de 12 heures et l'un d'eux, correspondant à l'intervalle entre 6 heures du soir et 6 heures du matin, est peint en noir.

En plus de l'aiguille Z des heures, l'horloge porte deux aiguilles marquées : l'une, commencement du tarif normal; l'autre : fin du tarif normal.

Si l'on met la première sur 4 heures du soir, la seconde sur 10 heures du soir, l'énergie consommée pendant ce temps sera enregistrée sur les cadrans supérieurs (tarif N).

L'énergie consommée pendant le reste du temps sera enregistrée à tarif réduit (tarif R) sur les cadrans inférieurs.

Par le déplacement des aiguilles de tarif, on peut donc mettre sur n'importe quelle heure le commencement et la fin du tarif normal.

En général, ces heures ne sont modifiées que deux fois par an et un agent de la station centrale vient les placer comme il convient, puis plomber l'horloge.

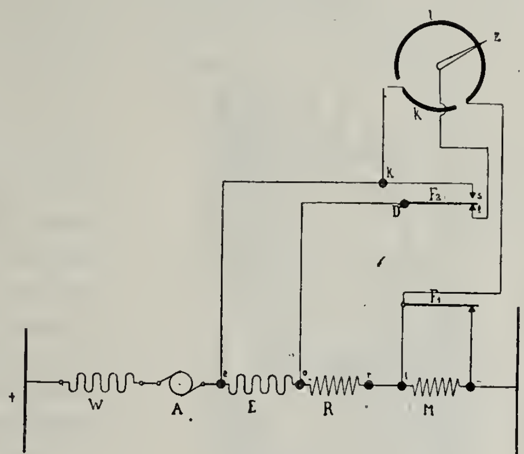


Fig. 85.

Le courant dérivé du réseau entre par l'aiguille Z, après avoir traversé les enroulements à fil fin W et A du compteur (*fig.* 85). Il passe de là dans l'un ou l'autre des segments $k$, $l$, réglés par la position des aiguilles de tarif.

R est un relais qui, lorsqu'il est excité, produit l'enregistrement sur les cadrans supérieurs (tarif N). Dans la position figurée, le ressort $F_2$ met le relais R en court-circuit et l'enregistrement se produit, par l'action d'un relais E, sur les cadrans inférieurs (tarif R).

Lorsque l'aiguille Z vient sur le secteur K, le relais E, de résistance égale à celle du relais R, est mis en court-circuit et, le relais R étant excité, le compteur enregistre l'énergie au tarif N.

Si, pour une raison quelconque, l'horloge vient à s'arrêter, le compteur enregistre constamment au tarif normal; en effet, à ce moment, le pendule reste vertical et maintient le ressort $F_2$ soulevé.

Le relai E est en court-circuit et le relai R actif, ce qui fait actionner les cadrans supérieurs (tarif N). La station ne peut donc subir de pertes. Dans ce compteur, on voit que le changement de tarif est obtenu électriquement par l'action de deux relais mis l'un en court-circuit pendant que l'autre est actif. Un index, placé à droite entre les deux séries de cadrans, montre toujours à quel tarif le compteur enregistre.

### 3° COMPTEUR A TARIFS VARIABLES

**Emploi.** — Une solution plus complète du problème de la tarification variable que celle qu'offrent les compteurs à double tarif est donnée par des compteurs spéciaux qui permettent d'enregistrer l'énergie consommée en la comptant à des tarifs que la station centrale peut modifier elle-même, à chaque instant, en agissant sur tous les compteurs à la fois et en suivant constamment la consommation du réseau.

Le seul compteur à tarifs variables exposé était celui de MM. Brown et Routin, qui donne

la faculté aux stations centrales d'appliquer, suivant les heures de la journée, autant de tarifs que l'on désire, système fort appréciable en ce sens qu'il permet de suivre aussi exactement que possible la loi de l'offre et de la demande.

**Compteur Brown et Routin.** — Ce compteur est à intégration discontinue, mais la période d'intégration, au lieu d'être réglée par le compteur lui-même, ainsi que cela se fait généralement, est commandée par la station centrale elle-même.

Pour une même consommation, un compteur intégrera, par exemple, d'autant plus souvent qu'on veut appliquer un tarif plus élevé.

Il faut donc agir à distance sur tous les compteurs du réseau. La base essentielle du système consiste à commander le mécanisme d'intégration des compteurs par une *horloge mère*, installée à la station, et à utiliser les mêmes conducteurs pour fournir le courant aux abonnés et pour transmettre aux compteurs les effets de l'horloge. Ces effets consistent en émissions plus ou moins fréquentes d'un courant différent de celui distribué. Ces courants se transmettent en gardant leur indépendance, ceux émis par l'horloge n'agissant que sur les mécanismes d'intégration des compteurs. Si le courant fourni aux abonnés est continu, celui destiné à n'agir que sur les compteurs sera alternatif. Au contraire, ce dernier sera continu si le premier est alternatif.

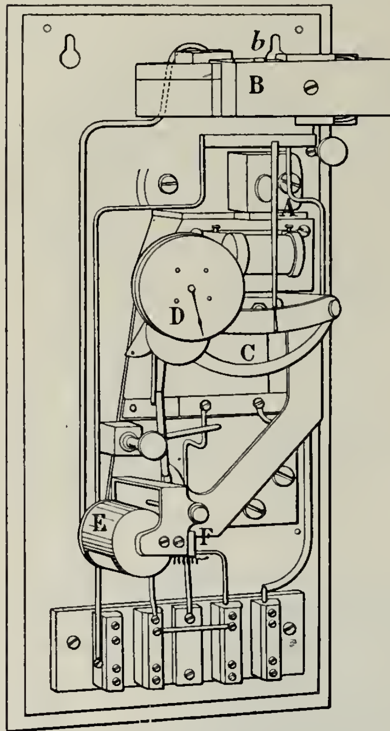


Fig. 86. — Compteur à tarifs variables Brown et Routin.

La figure 86 représente l'ensemble du compteur Brown et Routin. B est la bobine fixe à gros fil d'un wattmètre et *b* en est la bobine mobile en fil fin.

Cette dernière porte une aiguille A dont la déviation est proportionnelle à la puissance.

Chaque fois que l'horloge mère émet un courant, l'électro-aimant E du compteur fait remonter une came C, de profil déterminé, jusqu'à ce que celle-ci vienne buter contre la partie inférieure de l'aiguille A. L'angle dont la came a tourné avant de buter contre l'aiguille est proportionnel à la puissance indiquée par le wattmètre.

A chaque soulèvement de la came, cet angle est enregistré par le totalisateur D, au moyen d'un encliquetage à fine denture. Suivant l'heure de la journée ou l'importance de la demande d'énergie, on modifie *à l'usine* le nombre des courants émis chaque minute par l'horloge mère S'il se produit une, deux, trois, quatre émissions par minute, les consommations sont enregistrées une, deux, trois, quatre fois pendant ce temps.

Ceci revient au même que d'enregistrer la consommation une seule fois, mais en multipliant le prix du tarif minimum par un, deux, trois, quatre.

Les courants alternatifs agissant sur les compteurs sont empruntés à un petit alternateur spécial et envoyés en ligne par l'horloge mère, au moyen de relais. L'alternateur auxiliaire est relié au réseau, d'une part, et, d'autre part, à la terre par l'intermédiaire d'un condensateur.

Les électros E des compteurs sont branchés entre le sol et le réseau, la liaison au sol se faisant par un condensateur.

Grâce à l'emploi des condensateurs, le réseau à courant continu reste parfaitement isolé de la terre.

Si la distribution s'effectue par courants alternatifs, l'horloge mère envoie un courant continu, à chaque émission, dans les électros intégrateurs E des compteurs. Ces électros sont en

communication avec le réseau et avec la terre. Afin de ne pas compromettre l'isolement des canalisations, ils sont reliés au sol par l'intermédiaire de bobines de self-induction qui laissent passer le courant continu tout en constituant un véritable barrage pour les courants alternatifs.

Le système Brown et Routin est fort remarquable; il procure une tarification tout à l'avantage des abonnés qui consentent à modifier l'horaire de leur consommation maximum.

Par contre, comme la station peut faire avancer ou retarder à son gré les compteurs, une certaine confiance de la part des abonnés est nécessaire.

Il est vrai que ceux-ci, en observant le temps périodique des intégrations, peuvent se rendre facilement compte du tarif que la station applique à un moment donné.

La station centrale peut donc être contrôlée par les abonnés et, de ce chef, les garanties sont réciproques.

Le système multitarif de Brown et Routin est appliqué à Bordeaux depuis quelque temps ; il y donne des résultats très appréciés tant par les abonnés que par la station centrale.

---

# TABLE DES MATIÈRES

## QUATORZIÈME PARTIE

### COMPTEURS ÉLECTRIQUES



I

#### Compteurs de temps



II

#### Compteur de quantité



III

#### Compteurs d'énergie électrique

COMPTEURS A INTÉGRATION DISCONTINUE



IV

## Compteurs spéciaux

1° COMPTEURS A PRÉPAIEMENT



2° COMPTEURS A DOUBLE TARIF



3° COMPTEUR A TARIFS VARIABLES



Tours. — Imprimerie Deslis Frères, rue Gambetta, 6.

# L'Électricité à l'Exposition de 1900

Publiée avec le concours et sous la direction technique de MM.

**E. HOSPITALIER**
Rédacteur en chef de *l'Industrie électrique*

**J.-A. MONTPELLIER**
Rédacteur en chef de *l'Électricien*

AVEC LA COLLABORATION
*D'INGÉNIEURS ET D'INDUSTRIELS ÉLECTRICIENS*

## 15E FASCICULE
## APPLICATIONS DIVERSES

PAR

**P.-F. CHALON**, Georges **DARY**, **G. BAIGNÈRES**, **F. RODARY**
et **A. BAINVILLE**

PARIS
Vve CH. DUNOD, ÉDITEUR
49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 49
TÉLÉPHONE 147-92

1902

# L'ÉLECTRICITÉ

A

# L'EXPOSITION DE 1900

---

## QUINZIÈME PARTIE

## APPLICATIONS DIVERSES

### I

### APPLICATIONS AUX MINES

PAR **P.-F. CHALON**, INGÉNIEUR

L'utilisation de l'électricité dans les mines devient de plus en plus une pratique courante et, comme les applications se multiplient chaque jour sous les formes les plus diverses, l'on peut déjà prévoir l'époque très rapprochée où le courant électrique deviendra un agent indispensable de l'industrie des mines.

Les remarquables progrès réalisés dans cette voie depuis dix ans et l'importance des services rendus par l'électricité dans les exploitations de mines métalliques aussi bien que dans les charbonnages, sont dus à deux causes principales :

1° La substitution des *courants triphasés* au *courant continu;*

2° La distribution à grande distance de l'énergie produite par des groupes électrogènes concentrés en une ou plusieurs *stations centrales.*

Les avantages que présentent les courants alternatifs à haute tension sur le courant continu, dans les travaux d'une mine, peuvent être résumés de la manière suivante :

D'abord, ils permettent d'utiliser l'énergie électrique à toute distance, avec une grande économie de câbles conducteurs, et ils peuvent fournir à volonté, par une simple transformation, soit des courants de faible tension pour certains appareils, soit même des courants continus, comme il en faut pour les locomotives et pour les opérations à effectuer dans le voisinage des génératrices.

Quand le travail demandé à un moteur triphasé est supérieur à celui qu'il est capable de fournir, il s'arrête brusquement, sans accident et sans ralentissement préalable ; il n'en est pas de même du moteur à courant continu, qui peut marcher sous des charges très variables, mais qui, sous une trop forte charge, s'échauffe et brûle son induit. Cette particularité du moteur triphasé est particulièrement précieuse pour certains travaux de mine, comme la perforation mécanique par exemple ; si, en effet, le fleuret se coince ou se casse dans le trou de mine, le moteur s'arrête immédiatement et l'ouvrier n'a plus qu'à interrompre le courant et examiner sa machine pour se rendre compte de l'accident et y remédier.

Dans les charbonnages grisouteux, où les dangers de l'étincelle électrique sont si redoutés,

les moteurs polyphasés présentent une certaine sécurité, car, ne portant ni collecteurs ni balais, ils ne donnent pas lieu à la production d'étincelles ; tout autre est le moteur à courant continu, même lorsqu'on a pris la précaution de le renfermer dans une enveloppe métallique hermétiquement close, et son fonctionnement est reconnu assez dangereux pour qu'il ait été prohibé d'une façon absolue dans un grand nombre de mines grisouteuses.

Une autre cause de supériorité des moteurs triphasés sur les moteurs à courant continu, c'est qu'ils fonctionnent avec une vitesse sensiblement constante, même sous de fortes variations de charges ; cette vitesse, en effet, ne dépend que du nombre des pôles et de la fréquence du courant, aussi communiquent-ils une grande régularité de marche aux machines et outils qu'ils actionnent.

Enfin, comme il a déjà été dit plus haut, le moteur triphasé n'a pas de collecteurs ; c'est tout au plus si on lui adjoint parfois trois bagues à balais, mais celles-ci peuvent toujours être supprimées, de sorte que le danger pouvant résulter d'une production d'étincelles est radicalement supprimé.

Le seul inconvénient que présente l'emploi des courants alternatifs à haute tension, c'est la difficulté d'isoler suffisamment les lignes conductrices. En ce qui concerne les conducteurs principaux, on peut y arriver en groupant les trois fils recouverts d'isolants dans une gaine métallique ; la chose est moins aisée pour les câbles secondaires qui amènent le courant aux bornes des moteurs et des appareils et il est nécessaire d'employer des mesures spéciales de protection contre les détériorations, les courts circuits et le contact accidentel des ouvriers.

Les tensions dont on a besoin dans une mine sont généralement assez limitées. Elles peuvent atteindre 2 000 volts ; mais, en moyenne, elles ne dépassent pas 500 volts. Toutefois, on ne saurait fournir aucune indication précise à ce sujet et il y a lieu d'étudier, en particulier, pour chaque exploitation minière, et les tensions qui conviennent le mieux et le genre de conducteurs le plus approprié aux circonstances locales.

## A] — *STATIONS CENTRALES GÉNÉRATRICES ET INSTALLATIONS ÉLECTRIQUES*

Les installations électriques suivantes ont été décrites par leurs auteurs au Congrès international des Mines et de la Métallurgie à l'Exposition universelle de 1900.

**Installations des mines de Nœux.** — L'installation électrique des mines de Nœux (Pas-de-Calais), étudiée et exécutée par la Société alsacienne de Constructions mécaniques avec le concours de M. Bresson, ingénieur en chef de la Compagnie des Mines de Vicoigne et de Nœux, comprend une station centrale formée de quatre groupes électrogènes de 450 kw chacun. Un seul de ces groupes est actuellement en fonction.

On utilise les chaleurs perdues des fours à coke.

L'usine centrale comprend d'abord une batterie de huit chaudières Belleville, de 100 m² de surface de chauffe chacune, chauffées par les flammes de soixante fours à coke.

Les génératrices sont au nombre de deux. La première est un alternateur triphasé, avec excitatrice montée sur l'arbre, actionné par une machine à un cylindre de 250 chevaux ; le nombre de périodes est de 50 par seconde et le courant est produit à la tension de 250 volts.

Une partie de ce courant sert à actionner les appareils des fours à coke — défourneuse, culbuteurs, etc. — et à fournir l'éclairage ; l'excédent est envoyé à un transformateur qui élève la tension à 5 000 volts.

La seconde génératrice est un alternateur triphasé à 72 pôles, commandé par un moteur compound à deux cylindres de 500 chevaux. La fréquence est de 50 périodes par seconde et la tension de 5 000 volts.

Le courant à 5 000 volts est transporté, avec 4 pour 100 de perte, en trois points différents :

1° *Au puits numéro* 3, au moyen de fils de cuivre de 15 mm² de section ;

2° *Au rivage de Beuvry*, en passant par le puits numéro 6, au moyen de conducteurs de 35 mm² de section ; la longueur de la ligne est de 5 km ;

3° *Au puits numéro* 7, en passant par les puits numéros 1, 2, 4 et 5. La longueur de la ligne est d'environ 10 km, les câbles ont 100 mm² de section jusqu'au puits numéro 5 et 25 mm² seulement entre les puits 5 et 7.

Tous les conducteurs sont posés sur des isolateurs à triple cloche.

La première ligne est destinée spécialement à fournir de l'énergie au fond du puits numéro 3 ; les bâtiments de la surface sont éclairés par le courant continu de l'usine.

A cet effet, le courant de 5 000 volts est envoyé dans le puits au moyen d'un câble armé, à trois conducteurs, composé comme suit :

Les trois fils de 16 mm² de section sont soigneusement isolés et forment un câble unique qui est recouvert d'une enveloppe en plomb de 2,5 mm d'épaisseur, puis d'asphalte et enfin d'une armature en fils d'acier pouvant supporter le poids total des 400 m de câble, soit 3 050 kg.

Ce câble peut transmettre 350 chevaux sous une tension de 5 000 volts.

Dans le fond, divers transformateurs ramènent la tension à 250 volts pour actionner un treuil et à 130 et 95 volts pour la charge des accumulateurs destinés à la traction.

Les lignes sont établies, depuis la station centrale, sur des poteaux de sapin de 12 m ; ceux-ci sont munis à la partie supérieure d'un fil de ronce en fer galvanisé qu'on relie à la terre, de deux en deux poteaux, au moyen d'un fil de cuivre de 10 mm² de section et d'une tige de fer de 40 mm de côté enfoncée dans le sol.

Dans les passages au-dessus des voies et routes que traversent des fils télégraphiques ou téléphoniques, les trois fils aériens sont remplacés par un câble à grand isolement, armé d'un ruban d'acier, et la liaison se fait dans des boîtes de jonction à 5 m au-dessus du sol.

Dans les chemins ordinaires, les trois fils sont simplement isolés sur toute la traversée et jusqu'à 10 m de distance de chaque côté ; par surcroît de précaution, on les entoure d'un treillage en fils de fer galvanisés.

Les utilisations du courant sont les suivantes :

A. Aux fours à coke :

Des *culbuteurs de wagons*, mus par un moteur d'induction ;

Un *appareil mélangeur*, formé de trois plates-formes de dosage et une vis à palette de 26,50 m qui peut mêler et transporter 25 tonnes à l'heure ;

Une *chaîne à godets* et un *transporteur Kreis ;*

Une *défourneuse.*

B. Aux puits et galeries :

Un *treuil* de 35 chevaux, à embrayage mécanique ;

Une *pompe d'épuisement*, de 120 chevaux ;

Des *locomotives à accumulateurs.*

Le treuil électrique peut remonter 40 berlines à l'heure sur 77 m de hauteur.

La pompe refoule 70 m³ à l'heure à 360 m de hauteur ; elle est à trois corps, avec pistons plongeurs de 160 × 140 mm. Un quatrième corps à plongeur de 75 × 100 mm, animé d'un mouvement trois fois plus rapide que les premiers, sert de pompe compensatrice pour équilibrer les efforts d'une façon à peu près complète. Les soupapes sont à trois étages.

Le moteur électrique de 120 chevaux marche directement à 5 000 volts ; il est renfermé dans une enveloppe étanche que l'arbre traverse dans un presse-étoupes à ressorts. On maintient une certaine pression d'air dans l'enveloppe, afin de s'opposer à toute entrée de mélange grisouteux ; l'interrupteur à haute tension est dans un bain d'huile qui peut absorber les étincelles accidentelles.

L'application la plus intéressante de l'électricité au fond est celle de la traction. Les fosses de Nœux ayant toutes des quartiers grisouteux, le trolley devait être forcément proscrit; mais alors l'emploi d'accumulateurs exigeait la transformation du courant triphasé en courant continu.

La chambre de transformation et de charge communique avec les puits d'entrée et de sortie de l'air, de sorte qu'on peut la ventiler par un courant d'air spécial sans communication avec les travaux. On évite ainsi la présence du grisou et, d'autre part, les gaz des accumulateurs ne gênent pas l'aérage de la mine.

Cette station de charge renferme, suivant l'importance du trafic :

1° *Un ou plusieurs transformateurs de* 75 *kw* qui convertissent les courants triphasés à 5 000 volts en courants triphasés à 93 volts;

2° *Une ou plusieurs commutatrices de* 70 *kw* transformant les courants triphasés en courant continu à 130 volts;

3° Les *appareils de manœuvre et de contrôle* ainsi que les appareils accessoires pour la charge des batteries;

4° *Un pont transbordeur* pour manœuvrer les trucks d'accumulateurs.

C. A l'éclairage :

En septembre 1900, la station centrale alimentait : 80 lampes à arc et 2 276 lampes à incandescence, sur une longueur développée de 15 km de conducteurs.

Il est à remarquer que la lumière devient surtout nécessaire après trois ou quatre heures du soir, c'est-à-dire au moment où l'énergie demandée par les travaux divers ne dépasse pas 25 à 30 pour 100 de celle qu'exigent les services en pleine activité. Dans ces conditions, l'éclairage ne consomme que les disponibilités du courant et son utilisation contribue à augmenter notablement le rendement de la station centrale.

Pour l'alimentation des lampes, les transformateurs ramènent le voltage à 250 et 125 volts.

Une particularité intéressante de la station de Nœux, c'est qu'elle forme une sorte de service public et vend le courant à chacun des services de la mine au prix de 0,30 fr le kilowatt; le contrôle se fait à l'aide de compteurs *Elihu Thomson* placés à chaque poste. Quoique la vapeur soit obtenue au moyen des chaleurs perdues des fours à coke, on lui a attribué la valeur industrielle qu'elle aurait réellement si on utilisait des charbons de rebut, estimés généralement à 7,20 fr la tonne : c'est ce qui explique le prix relativement élevé du kilowatt.

**Installations électriques des mines de Carmaux.** — Ces installations ont été faites sous la direction de M. Ch. Pérès, ingénieur en chef des mines de Carmaux.

La station centrale comprend quatre groupes électrogènes de 350 chevaux chacun qui peuvent être couplés en quantité; dans le même bâtiment sont placés les transformateurs et un tableau de distribution.

Chaque groupe est composé d'une machine à vapeur, d'un alternateur et de son excitatrice.

La machine à vapeur est horizontale compound, avec deux cylindres montés en tandem; elle consomme 9,75 kg de vapeur par cheval-heure, avec échappement à l'air libre.

L'alternateur triphasé est du type Siemens et Halske, à inducteur mobile et induit fixe, avec 60 pôles.

L'induit est formé de 180 barres de cuivre, isolées et logées dans les rainures d'un noyau feuilleté; elles constituent trois circuits montés en étoile.

L'excitatrice est une dynamo à courant continu excitée en dérivation, avec un inducteur tétrapolaire fixe intérieur et un induit mobile extérieur. Elle développe, à pleine charge, 115 volts et 80 ampères.

L'alternateur présente les caractéristiques suivantes :

| | |
|---|---|
| Nombre de tours par minute | 100 |
| Nombre de périodes par seconde | 50 |
| Tension du courant | 240 volts |
| Débit en pleine charge | 750 ampères |

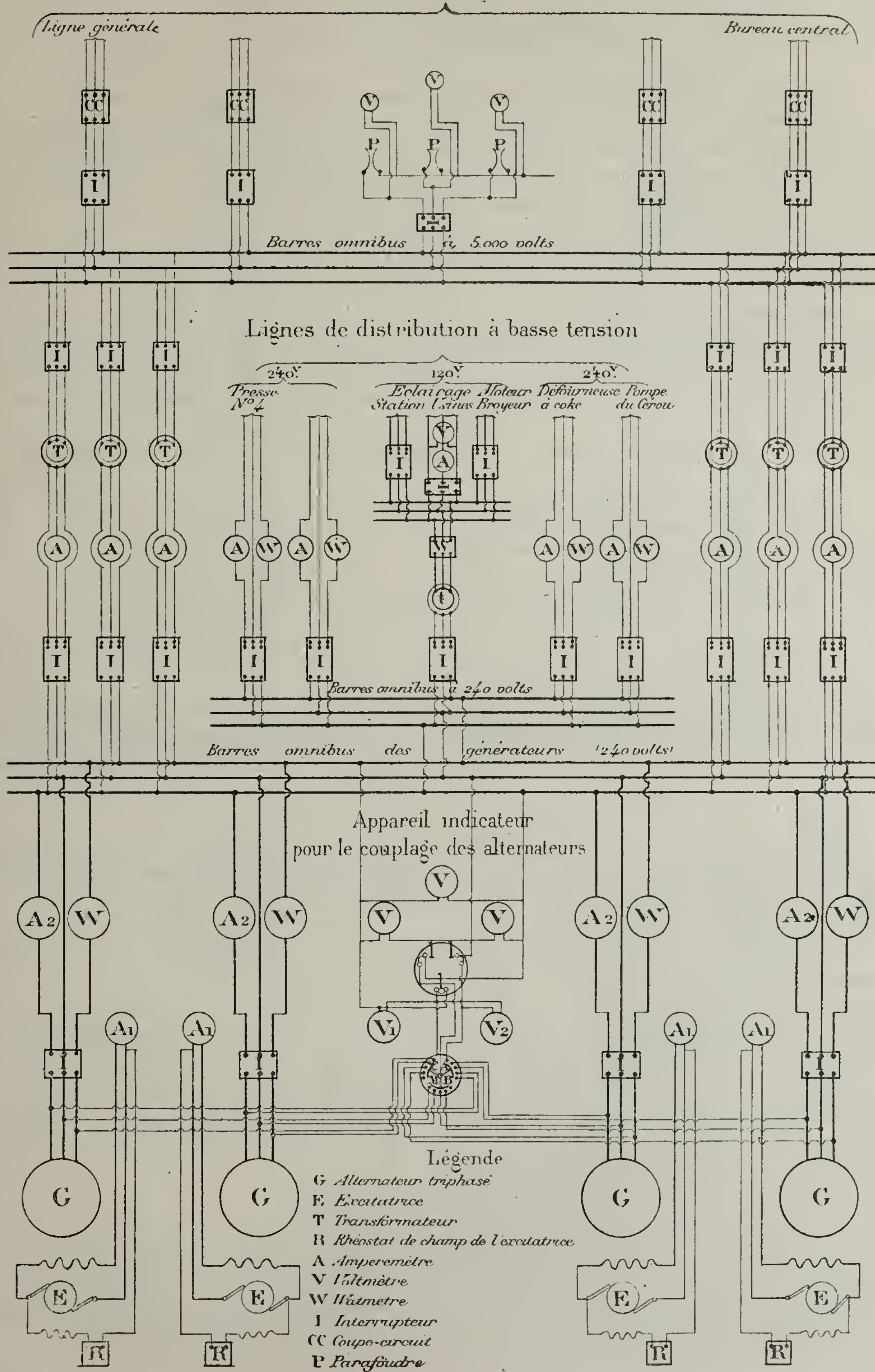



Fig. 1. — Tableau de distribution de la station centrale des mines de Carmaux.

Puissance développée à pleine charge :

| | |
|---|---|
| 1° Sur circuit à résistance non inductive | 330 kw |
| 2° — — inductive | 240 — |

Le tableau central de distribution (*fig.* 1) est disposé à l'une des extrémités de l'usine et à 2,50 m du mur. Il est divisé en trois étages : l'étage supérieur porte les interrupteurs, les coupe-circuits, les rhéostats et les appareils de mesure; l'étage du milieu est réservé aux appareils de manœuvre et de mesure relatifs au départ des lignes à basse tension ; enfin, l'étage inférieur porte les coupe-circuits et les commutateurs qui commandent les lignes à haute tension ; ces derniers appareils sont placés dans une vitrine fermée

Des escaliers permettent d'accéder aux étages sur les deux façades, antérieure et postérieure.

Les transformateurs, du type Siemens et Halske, sont au nombre de six. Chacun d'eux peut supporter normalement un courant de 360 ampères sous 240 volts, dans le circuit primaire, et de 18 ampères sous 5 000 volts dans le circuit secondaire, ce qui correspond à 150 kw sur un circuit à résistance non inductive. Leur rendement à pleine charge est de 96 à 97 pour 100.

Les dépenses des trois groupes électrogènes, soit pour 1 050 chevaux, comprennent :

| | |
|---|---|
| 1° La main-d'œuvre journalière pour la conduite et la surveillance : un électricien, un mécanicien et un aide | 34,50 fr |
| 2° Le petit entretien et le graissage | 57,25 |
| 3° La consommation de vapeur | 34,77 |
| On compte par cheval-heure 12 kg de vapeur à 0,115 fr les 1 000 kg. | |
| Total pour 24 heures | 126,52 fr |

Soit une dépense de 5,27 fr par heure.

En supposant que toute l'énergie soit distribuée sur un circuit à résistance inductive, avec $\cos \varphi = 0{,}70$, auquel cas les trois groupes produisent 720 kw, on voit que le prix de revient du kilowatt est de 0,008 fr seulement, mais dans ce chiffre n'entrent ni les frais généraux, ni l'amortissement, ni les frais de réparation et de gros entretien du matériel, etc.

Dans les mêmes conditions, le prix coûtant du cheval-heure effectif des machines à vapeur qui ont été supprimées était de 0,04 fr. Le prix des 1 000 kg de vapeur, produite par les anciens générateurs à bouilleurs avec des combustibles de rebut, était en moyenne de 2,21 fr en y comprenant l'entretien et la main-d'œuvre.

Le principe qui a été adopté, à Carmaux, pour la distribution de l'énergie électrique, est le suivant :

*a*) On utilise directement le courant à 240 volts que produit la station centrale, pour actionner les moteurs des usines spéciales — *agglomérés*, *coke*, *laverie* — en abaissant de 240 à 120 volts la portion de courant destinée à assurer l'éclairage ;

*b*) On relève de 240 à 5 000 volts la tension du courant qui doit être transporté à distance; des sous-stations abaissent ensuite de 5 000 à 240 volts le courant destiné à la force motrice et de 5 000 à 120 celui de l'éclairage.

De la station centrale partent quatre lignes :

1° *Une ligne à* 120 *volts*, pour l'éclairage des usines spéciales ;

2° *Une ligne à* 240 *volts*, pour les moteurs de ces usines ;

3° *Une ligne à* 5 000 *volts*, pour la sous-station de la direction, sise à 950 mètres de distance ;

4° *Une ligne à* 5 000 *volts*, qui porte le courant dans les sous-stations des puits et dont le développement est de 4 350 m.

Chacun des centres principaux peut être isolé en cas de réparation urgente ou d'accident; à cet effet, les diverses lignes sont fixées, à l'aide d'isolateurs, à l'intérieur d'une cheminée, de 15 m de hauteur et 1,25 m de diamètre intérieur, qu'on désigne sous le nom de *tour de sectionnement*. La base est logée dans un hangar fermé de 3 m de hauteur et de 1,50 m de largeur.

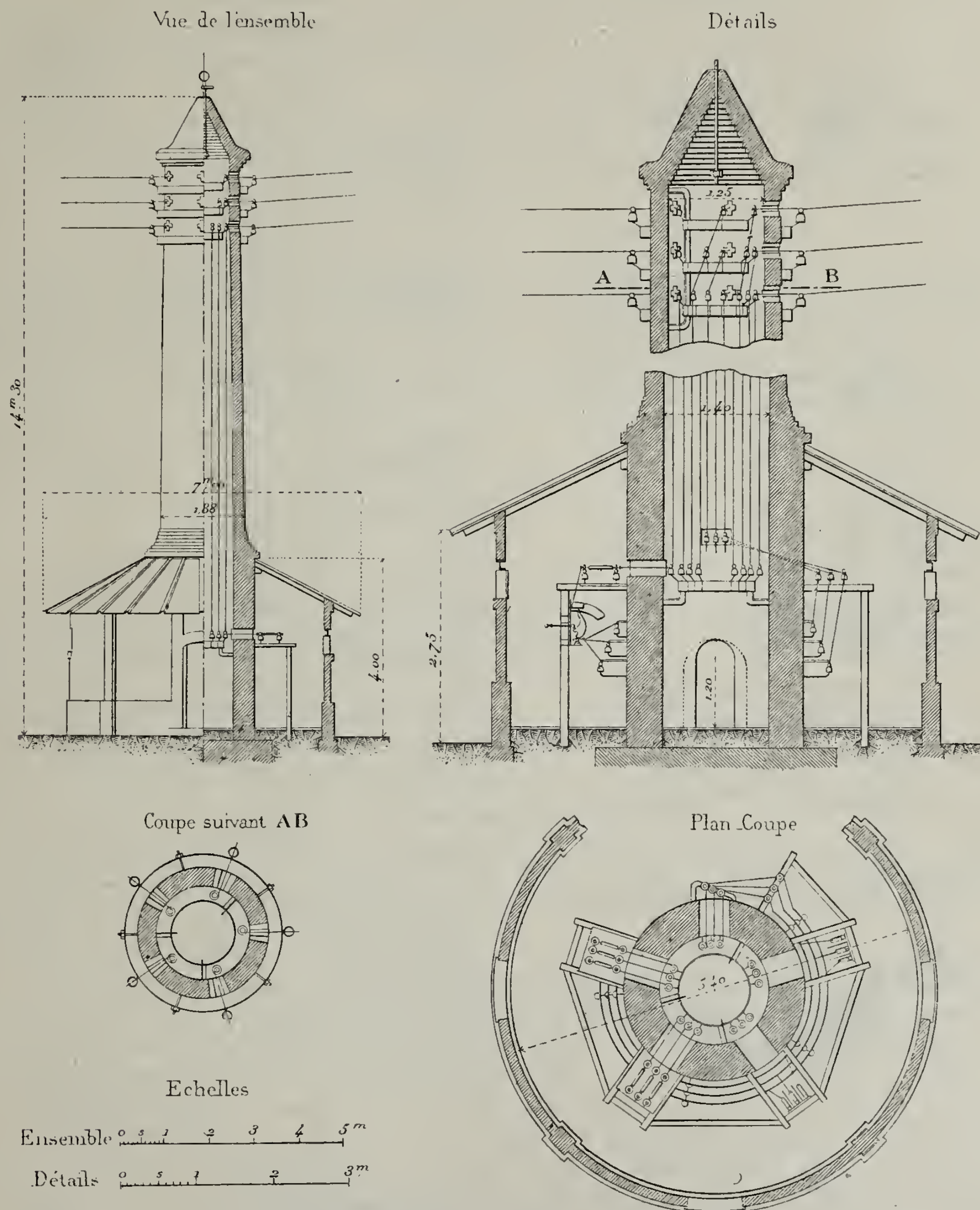


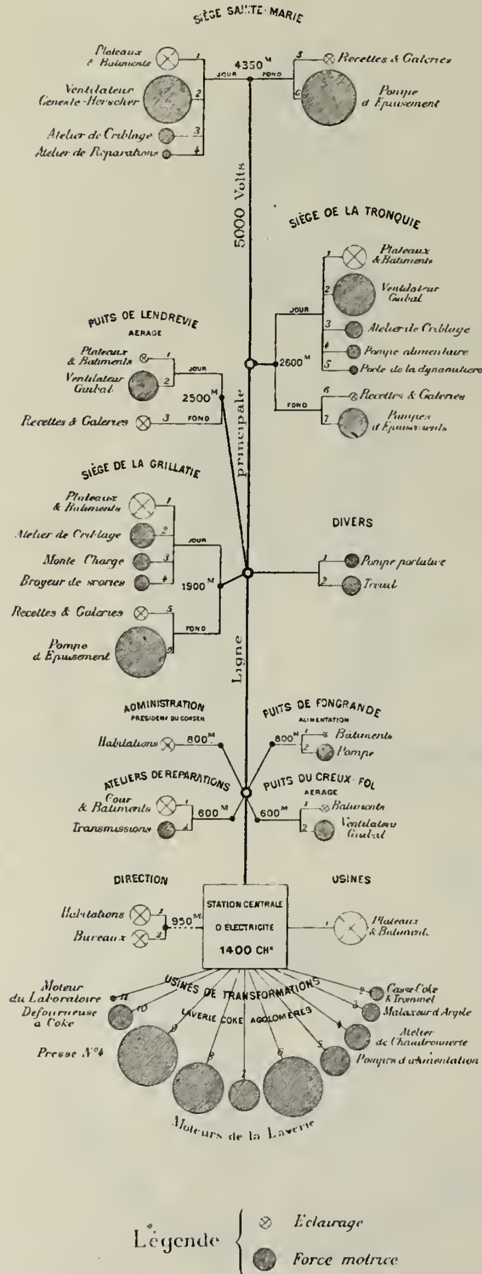

Fig. 2. — Tour de sectionnement du réseau des lignes électriques des mines de Carmaux.

Les lignes conductrices traversent le haut de la tour et sont reliées à des commutateurs, interrupteurs et à des coupe-circuits, fixés dans la chambre inférieure (*fig.* 2).

Quant aux lignes elles-mêmes, elles sont constituées par trois fils de cuivre, fixés sur des poteaux en bois de 10 à 15 m de hauteur, à l'aide d'isolateurs à triple cloche, pour les courants

de haute tension, ou à double cloche, pour les basses tensions. Ces poteaux sont distants de 40 m environ.

A la traversée des chemins, les lignes sont enveloppées d'une gaine en fils d'acier pour les protéger et s'opposer à leur chute.




LEGENDE

Etat des installations en Mars 1900

| Nos d'Ordre | UTILISATION | Nombre de lampes à incand. | Nombre de lampes à arc | Puissance des moteurs en ch. vap. |
|---|---|---|---|---|
| | **Siége Sainte-Marie** | | | |
| | Installations extérieures | | | |
| 1 | Éclairage des plateaux, bureaux, vestiaires, recettes, criblages, chaudières, machines, etc. | 143 | 3 | |
| 2 | Moteur du ventilateur Geneste Herscher de 2m,00 de diamètre servant à l'aérage de la mine | | | 40 |
| 3 | Moteur de l'atelier de triage et classification des houilles | . | . | 0 |
| 4 | Moteur de l'atelier de réparations | . | . | 3 |
| | Installations souterraines | | | |
| 5 | Éclairage des recettes 140 et 190 des écuries et des principales galeries de roulage | 37 | . | . |
| 6 | Pompe d'exhaure installée à 200m de profondeur | . | . | 105 |
| | **Siége de la Tronquie** | | | |
| | Installations extérieures | | | |
| 1 | Éclairage des plateaux, bureaux, vestiaires, recettes, criblages, chaudières, machines, etc. | 157 | 5 | . |
| 2 | Moteur du ventilateur Guibal de 9m,00 de diamètre servant à l'aérage de la mine | . | . | 65 |
| 3 | Moteur de l'atelier de triage et classification des houilles | . | | 10 |
| 4 | Pompe élevant les eaux de surface dans les bassins d'alimentation des chaudières | . | | 5 |
| 5 | Radiateurs électriques pour le chauffage de la dynamitière | . | . | 4 |
| | Installations souterraines | | | |
| 6 | Éclairage des recettes 370 et 425 et des principales galeries de roulage | 20 | . | . |
| 7 | Pompe d'exhaure installée à 350m de profondeur | . | . | 35 |
| | Pompe installée à 50m de profondeur élevant les eaux des terrains aquifères dans les bassins d'alimentation des chaudières | . | . | 5 |
| | **Siége de la Grillatie** | | | |
| | Installations extérieures | | | |
| 1 | Éclairage des plateaux, bureaux, vestiaires, recettes, criblages, chaudières, machines, etc. | 164 | 8 | |
| 2 | Moteur de l'atelier de triage et classification des houilles | . | . | 25 |
| 3 | Moteur du monte-charge | . | . | 10 |
| 4 | Moteur du broyeur à scories | | . | 6 |
| | Installations souterraines | | | |
| 5 | Éclairage des recettes 140, 188, 209, des écuries et des principales galeries de roulage | 46 | . | . |
| 6 | Pompe d'exhaure installée à 210m de profondeur | . | . | 85 |
| | **Puits de Lendrevie** | | | |
| | Installations extérieures | | | |
| 1 | Éclairage des plateaux, vestiaires, recettes, machines, etc. | 31 | . | . |
| 2 | Moteur du ventilateur Guibal de 9m,00 de diamètre servant à l'aérage de la mine | . | . | 30 |
| | Installations souterraines | | | |
| 3 | Éclairage des recettes, écuries et principales galeries de roulage | 47 | . | . |
| | **Puits du Creux-Fol** | | | |
| 1 | Éclairage du bâtiment | 6 | . | . |
| 2 | Moteur du ventilateur Guibal de 9m,00 de diamètre servant à l'aérage d'une partie des travaux du siège de la Grillatie | . | . | 15 |
| | **Puits de Fongrande** | | | |
| 1 | Éclairage du bâtiment | 2 | . | . |
| 2 | Moteur de la pompe installée à 60m de profondeur élevant les eaux des terrains aquifères dans un réservoir | . | . | 10 |
| | **Ateliers de réparations** | | | |
| 1 | Éclairage des ateliers de réparations, bureaux, magasins, écuries, cours, etc. | 120 | 1 | |
| 2 | Moteur des transmissions et des machines-outils | | . | 10 |
| | **Administration** | | | |
| | Président du conseil | | | |
| | Éclairage au Château de la Verrerie | 53 | . | . |
| | **Direction** | | | |
| 1 | Éclairage des maisons d'habitation | 162 | . | |
| | Calorifère électrique | . | . | 3 |
| 2 | Éclairage des bureaux de la direction | 83 | . | |
| | **Usines de Transformations** | | | |
| 1 | Éclairage des plateaux, station centrale d'électricité, fours à coke, laverie des houilles, usine à agglomérés et divers | 216 | 24 | |
| 2 | Moteur du concasseur et classeur des menus de coke | " | " | 5 |
| 3 | Moteur du malaxeur d'argile | | . | 10 |
| 4 | Moteur de l'atelier de chaudronnerie | . | . | 25 |
| 5 | Moteur de 2 pompes élevant l'eau de la rivière dans les réservoirs d'alimentation des chaudières Belleville | . | " | 30 |
| 6, 7, 8 | Moteurs de la laverie des houilles (125, 100, 40ch) | . | | 265 |
| 9 | Moteur de la presse N° 4 de l'usine à agglomérés | . | . | 125 |
| 10 | Moteur de la défourneuse du coke | . | . | 25 |
| 11 | Moteur du broyeur du laboratoire d'incinération | . | . | 1 |
| | **Divers** | | | |
| 1 | Pompe électrique transportable pour le vidange et le nettoyage des bassins d'alimentation | . | . | 5 |
| 2 | Treuil électrique | . | . | 10 |
| | Totaux | 1293 | 41 | 1004 |
| | Totaux en chevaux | 129 | 41 | 1003 |
| | Total général en chevaux | 1173 | | |

Production

Station centrale d'électricité

| | |
|---|---|
| 3 Groupes électrogènes de 350 chevaux avec alternateurs triphasés de 750 ampères et 240 volts | 1050ch |
| Un quatrième groupe est en voie d'installation | 350 |
| Total | 1400ch |

Fig. 3. — Schéma indiquant la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique aux mines de Carmaux.

Les lignes à haute tension ont un rendement de 97 pour 100; les autres, à basse tension, qui sont plus coûteuses, rendent de 95 à 97 pour 100, selon les applications.

A chaque poste ou établissement, la ligne pénètre dans une sous-station et aboutit à trois

barres omnibus, sur lesquelles sont faites les prises de courant qui vont aux transformateurs ; une tour de sectionnement en maçonnerie précède immédiatement la sous-station.

La figure 3 indique la position de la station centrale, la distribution et toutes les utilisations du courant électrique.

Les transformateurs envoient le courant à basse tension à deux tableaux de distribution qui comportent tous les appareils de mesure et de sécurité nécessaires, l'un à 240 volts pour la force motrice, l'autre à 120 volts pour l'éclairage.

C'est des barres omnibus à haute tension que part le câble armé pour les travaux souterrains.

L'énergie utilisée dans les divers services de la mine représente une puissance totale de 1 173 chevaux, comprenant :

| | |
|---|---|
| Pour l'éclairage ........................ | 170 chevaux |
| Pour la force motrice........................ | 1 003 — |

Mais, comme l'éclairage est à son maximum alors que les autres emplois sont restreints, il en résulte que la puissance de 1 050 chevaux des trois groupes électrogènes suffit largement à toutes les exigences.

Les essais au frein effectués sur tous les électromoteurs avant leur mise en service ont indiqué :

| | Pour 100 |
|---|---|
| Moteurs de 1 à 10 chevaux, rendement ........................ | 82 |
| — 10 à 30 — — ........................ | 87 |
| — 30 à 60 — — ........................ | 90 |
| — 60 à 125 — — ........................ | 93 |

Le *rendement industriel*, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie recueillie sur l'arbre des réceptrices et celle qui est mesurée sur l'arbre de la machine à vapeur de l'usine centrale, dépend du mode d'utilisation des moteurs et des transformations du courant :

| | Pour 100 |
|---|---|
| Moteurs utilisant directement et sans transformation le courant de la station centrale ........................ | 72 à 82 |
| Moteurs utilisant le courant deux fois transformé........................ | 68 à 78 |
| Moteurs utilisant le courant transformé une seule fois ........................ | 80 à 81 |

Après une série d'expériences faites avec les groupes électrogènes et les réceptrices fonctionnant à pleine charge, M. Ch. Pérès a trouvé que le rendement général de l'installation varie entre 67 et 79 pour 100.

**Installations électriques du siège Espérance (Belgique).** — Ces installations ont été faites, en 1899, sous la direction de M. l'ingénieur P. Habets, au siège *Espérance* de la *Société anonyme des charbonnages de l'Espérance et Bonne-Fortune*, à *Montégnée-lez-Liège*. C'est la première fois qu'une application aussi générale de l'électricité ait été réalisée dans une mine belge.

La station centrale est composée de trois groupes électrogènes, de 200 kw chacun, et comprend des alternateurs triphasés Brown, type volant, à induit fixe et inducteur mobile extérieur, débitant les courants triphasés à la tension de 1 000 volts avec une fréquence de 44 périodes par seconde. Chaque alternateur est commandé par une machine compound jumelle, à condensation, pouvant développer 300 chevaux effectifs à la vitesse de 125 t : m et à la pression de 6,5 kg : cm² à l'admission.

Les alternateurs devant marcher en parallèle, chaque moteur possède au régulateur un dispositif spécial qui permet de faire varier la vitesse de 116 à 134 tours pour maintenir le synchronisme.

Le hall qui contient l'usine centrale mesure 28 m de longueur et 10,50 m de largeur. Les

condenseurs et pompes à air sont logés dans les fondations et actionnés par bielles s'articulant aux boutons des manivelles des grands cylindres.

A l'extrémité du hall est disposé le tableau de distribution qui est séparé du mur du fond par un espace de 2 m.

Entre les fondations des machines et celles des murs sont ménagés deux larges caniveaux, l'un contient les conduites d'eau et de vapeur, l'autre les canalisations électriques. Dans ce dernier on a disposé, sur l'une des parois, les câbles à haute tension et, sur l'autre, les lignes de basse tension.

Les câbles à haute tension sont isolés au moyen de deux couches de caoutchouc vulcanisé, serrées par une tresse imprégnée que recouvre un ruban enduit d'un isolant spécial ; ils sont soutenus sur des poulies en porcelaine.

L'excitation des alternateurs est obtenue au moyen :

1° *D'un transformateur statique*, d'une puissance de 30 kw, qui reçoit le courant triphasé à 1 000 volts et l'abaisse à 87 ;

2° *D'une commutatrice tétrapolaire*, à excitation compound, qui reçoit le courant triphasé à 87 volts par trois bagues et débite du courant continu à 110 volts.

On effectue la mise en marche au moyen d'un groupe électrogène Dulait à courant continu placé contre le mur du hall entre les alternateurs 1 et 2. L'un des alternateurs étant mis en mouvement et excité par le courant de la dynamo Dulait, on fait démarrer la commutatrice comme moteur à courant continu, en lui donnant l'excitation convenable et, dès que la vitesse du synchronisme est obtenue, on la met en phase avec l'alternateur. On interrompt alors le courant qui a servi au démarrage et l'on met le circuit d'excitation des alternateurs sur le circuit à courant continu de la commutatrice qui fonctionne alors normalement.

Au tableau de distribution correspondent, pour chaque alternateur :

*Un rhéostat d'excitation ;*

*Un voltmètre avec transformateur réducteur ;*

*Un ampèremètre ;*

*Un interrupteur tripolaire ;*

*Deux coupe-circuits unipolaires ;*

*Un indicateur de phases.*

Les lampes de l'indicateur de phase sont reliées aux circuits à basse tension des transformateurs réducteurs des voltmètres, avec intercalation d'interrupteurs qui permettent de ne mettre en circuit que les lampes correspondantes pour la mise en phase des alternateurs 1 et 2, 2 et 3, 1 et 3.

Le tableau contient, en outre, pour chaque circuit de départ :

*Un interrupteur tripolaire ;*

*Un ampèremètre ;*

*Deux coupe-circuits unipolaires.*

Les fils fusibles des coupe-circuits sont enfermés dans des cartouches de matière isolante qui permettent au besoin de remplacer le plomb fondu sans arrêter la machine et, comme d'ailleurs ils sont tous placés après l'interrupteur qui commande le circuit, on peut remplacer les cartouches très rapidement et sans danger.

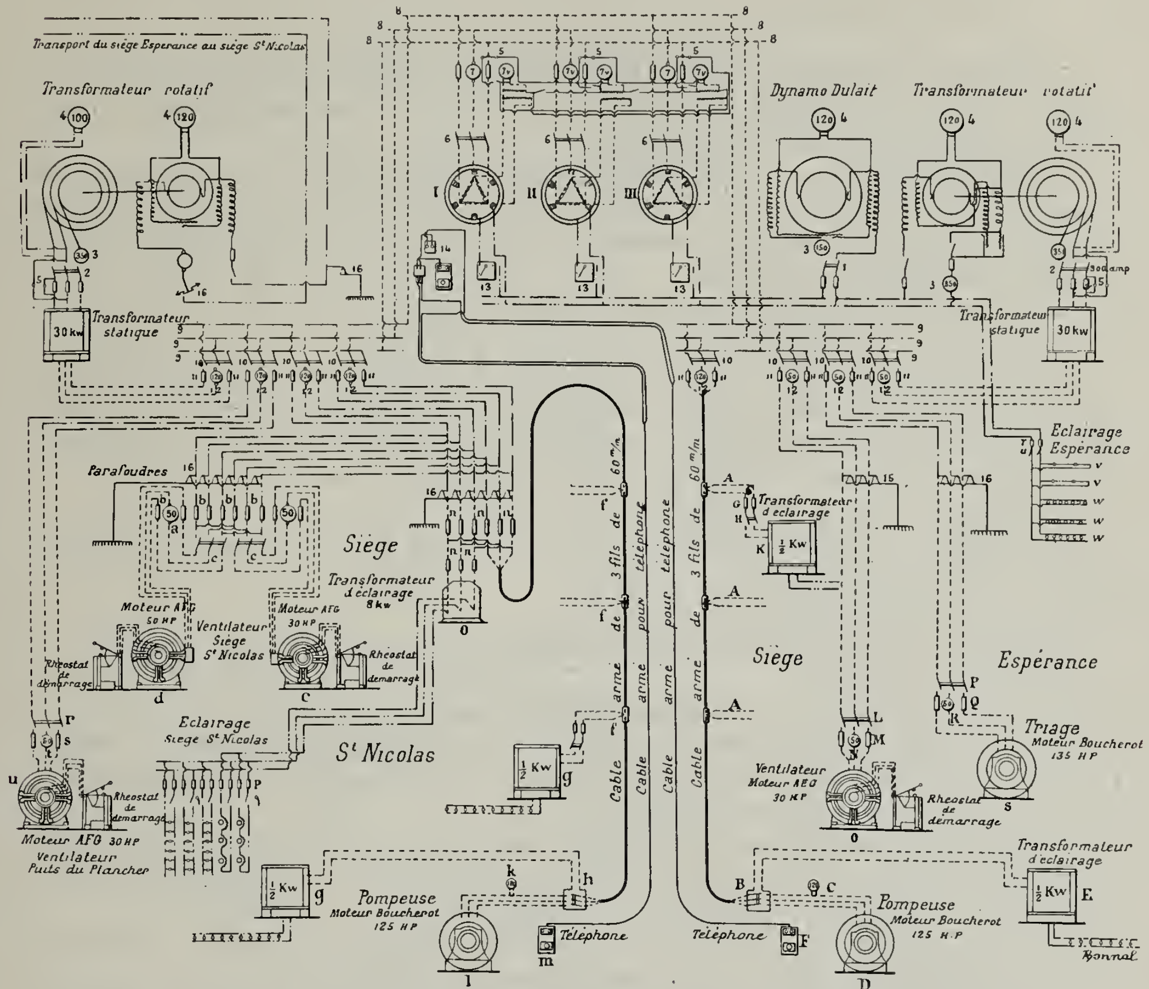
Les lignes aériennes amenant le courant aux divers services des sièges Espérance et Saint-Nicolas sont en fils de cuivre placés sur des isolateurs à triple cloche en porcelaine, dont les ferrures sont fixées à des murs ou sur des traverses de poteaux tubulaires en acier. Un filet protecteur, relié à la terre, est placé sous les lignes afin de parer à tout accident qui résulterait de la chute des fils.

Pour amener le courant aux travaux souterrains, les trois fils, de 60 mm² de section, sont revêtus de caoutchouc vulcanisé, d'okonite et d'un ruban isolant, tordus en hélice, avec interposition de bourrage, et enveloppés de ruban imprégné et d'une gaine de plomb ; le câble ainsi formé est armé en fils d'acier galvanisés et recouverts de chanvre.

Dans la descente des puits, les câbles reposent sur des ferrures en fer forgé, scellées, tous les 5 m, dans la maçonnerie.

A chaque recette, le câble aboutit à une boîte de dérivation sur laquelle se place un transformateur statique destiné à abaisser la tension pour les appareils d'éclairage.

Le schéma (*fig.* 4) représente l'ensemble de la distribution de l'énergie électrique ; comme on le voit, la station centrale dessert les récepteurs suivants :




IG. 4. — Schéma de la distribution d'énergie électrique à la Société des charbonnages de l'Espérance.

Au siège Espérance :

*a*) A l'usine centrale :

1° *Un transformateur et une commutatrice de* 30 *kw*, pour l'excitation des génératrices éclairage du siège Espérance ;

2° *Un transformateur et une commutatrice*, pour la traction ;

*Un moteur*, pour l'atelier de réparation ;

*b*) Au dehors de l'usine :

1° *Un moteur*, pour le ventilateur ;

2° *Un moteur*, pour le triage ;

3° *Une pompe ;*

4° *L'éclairage souterrain.*

Au puits du Plancher :
*Un moteur*, pour le ventilateur.

Au siège Saint-Nicolas :
1° *Deux moteurs*, pour le ventilateur ;
2° *Une pompe ;*
3° *L'éclairage du siège ;*
4° *L'éclairage souterrain.*

**Installations électriques des mines de Frongoch (Pays de Galles).** — La Société belge des Mines de Frongoch (Galles), qui exploite des minerais de blende et galène, emploie le courant électrique, depuis 1900, pour tous ses services.

L'exploitation est faite par un puits vertical jusqu'à l'étage de 160 m, et se continue en puits incliné jusqu'au niveau 277. Le minerai de blende-galène est transporté, à l'état de tout venant, dans une usine de préparation mécanique, où il est broyé, criblé, séparé et concentré ; l'extraction est de 15 tonnes par jour.

La force motrice est hydraulique, mais une machine auxiliaire à vapeur permet d'y suppléer en cas d'accident ou d'insuffisance.

Les eaux de pluie, recueillies dans des collecteurs de montagne, sont amenées par une conduite de 5 km dans un grand réservoir de 40 000 m³, lequel fournit une chute d'eau de 125 m de hauteur au moyen de 450 m de tuyaux mesurant 0,60 m de diamètre. Cette chute est la force motrice initiale qui alimente une station électrique centrale de 400 chevaux.

La station comprend :

Une chaudière tubulaire Babcock et Wilcox timbrée à 10 kg et une machine verticale à grande vitesse ; c'est la réserve ;

Une roue Pelton avec régulateur automatique ;

Un alternateur triphasé faisant 375 tours ; puissance, 300 kw ;

Une dynamo excitatrice ;

Un tableau de distribution, des coupe-circuits, des fusibles, etc.

Le courant triphasé de 2 300 volts est conduit à l'usine de préparation mécanique, située à 1 200 m, puis au siège d'extraction, à 650 m plus loin ; la première ligne a des conducteurs de 3,5 mm² de section, la seconde de 3,25 mm².

A l'usine, deux électromoteurs de 75 chevaux mettent en marche, l'un les broyeurs, l'autre les trommels, les jigs, les tables oscillantes et les pompes. En outre, un transformateur de 10 kw fournit la lumière à trois groupes de six lampes à arc.

Entre l'usine et la mine, sur le conducteur principal, est branché un petit transformateur qui alimente des lampes à incandescence dans les bureaux et dépendances.

Au siège d'extraction sont disposés deux électromoteurs de 75 chevaux ; le premier, à haute tension, à l'étage 160, actionne une pompe à trois corps qui élève 25 litres d'eau par seconde et qui fait 535 révolutions. Un petit transformateur, dans la chambre des pompes (*fig.* 5), donne le courant nécessaire pour l'éclairage des étages 160 et 277.

Le second électromoteur, à basse tension, est installé à la surface et actionne un treuil d'extraction à double tambour. Il peut fournir 125 chevaux au démarrage. Le voltage de 2 300 volts de la ligne est réduit à 220 par l'intermédiaire d'un transformateur de 60 kw, lequel sert, en outre, à fournir l'éclairage au reste du puits.

Enfin, à l'étage 160, est installé un électromoteur de 30 chevaux qui, à la vitesse de 670 t : m, actionne un treuil à simple tambour pour l'extraction des minerais par le puits incliné.

Toute cette installation a coûté 250 000 francs et a été terminée en moins d'une année.

En résumé, la station centrale électrique pour la distribution de l'énergie à grande distance permet d'utiliser l'énergie dans des conditions très avantageuses.

Tandis que la perte pour transmission par kilomètre est de :

40 pour 100 par la vapeur ;
20 — par les conduits hydrauliques ;
6 à 8 — par l'air comprimé,

elle n'est que de 5 pour 100 par les conducteurs électriques.

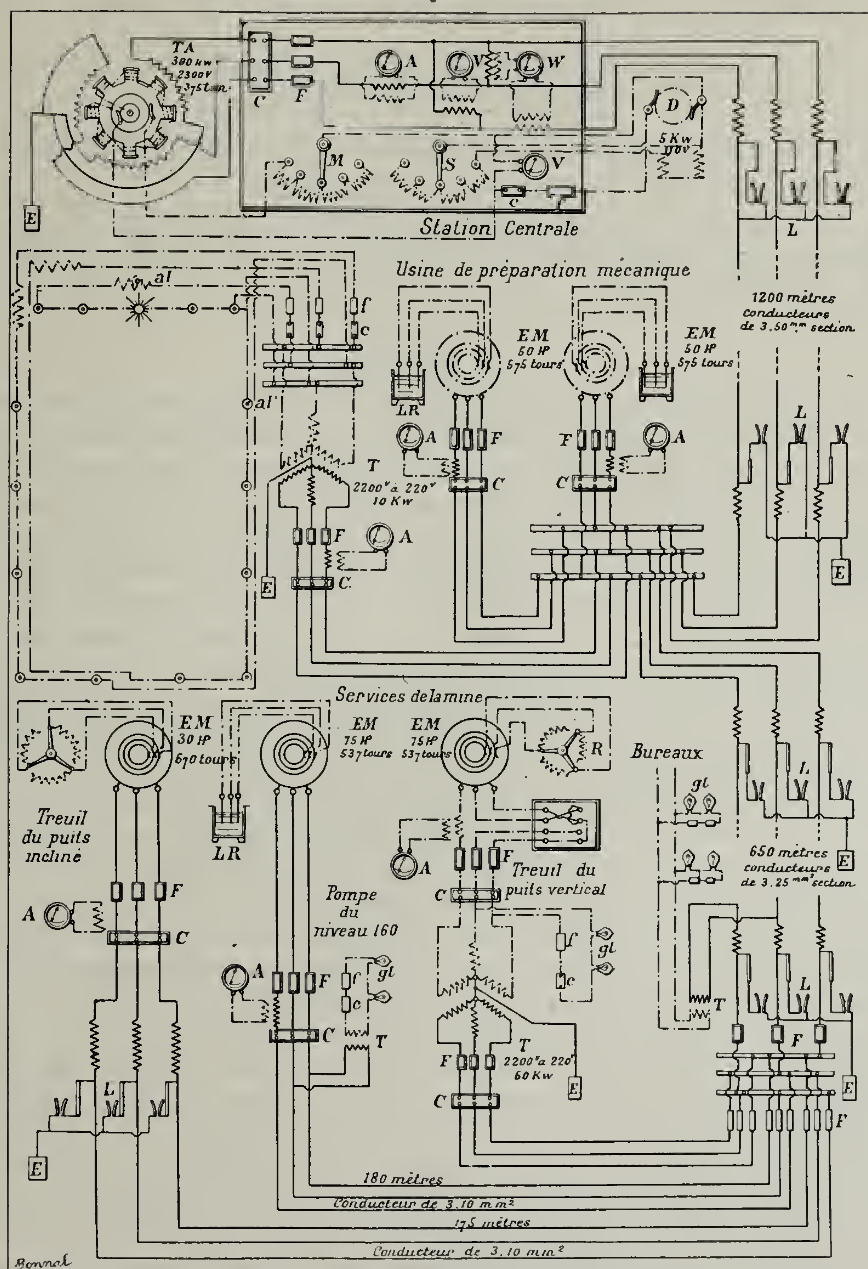



Fig. 5. — Schéma de la station centrale et de la distribution d'énergie électrique de la mine de Frongoch (Galles).

LÉGENDE EXPLICATIVE DU SCHÉMA

TA, alternateur triphasé. — D, excitatrice. — A, ampèremètre. — V, voltmètre. — W, wattmètre. — C, c, coupe-circuits. — F, f, fusibles. — M, régulateur magnétique. — S, régulateur shunt. — L, prise de courant pour l'éclairage électrique. — EM, électromoteurs. — T, transformateurs. — LR, résistance liquide. — R, résistance métallique. — Cm, commutateur. — al, lampes à arc. — gl, lampes à incandescence. — E, terre.

———, lignes à haute tension. — - — - — -, lignes à basse tension.

Quant au rendement général, c'est-à-dire le rapport entre le travail initial fourni par l'agent générateur d'énergie et le travail final utilisé, il est de 70 pour 100 environ avec le courant électrique, tandis qu'il est seulement de :

15 pour 100 au maximum avec la vapeur.
44 — — avec l'air comprimé.

## *B). — PRINCIPALES APPLICATIONS DE L'ÉLECTRICITÉ A L'INDUSTRIE MINIÈRE*

Le courant électrique permet d'effectuer rapidement et économiquement tous les travaux que l'on demande habituellement à la vapeur ou à l'air comprimé.

Nous ne citerons que les principaux, ceux qui exigent des appareillages spéciaux pour la commande électrique et dont l'Exposition nous montre un certain nombre de types nouveaux et particulièrement intéressants.

### *a*). — ÉPUISEMENT

On sait que les pompes d'épuisement diffèrent considérablement selon les circonstances.

S'il ne s'agit que d'un épuisement à faible hauteur, ne dépassant pas 12 m, on peut employer la *pompe centrifuge* qu'on accouple directement sur un électromoteur. Cependant, on emploie aussi quelquefois le système de pompes centrifuges conjuguées ou en série, par nombre de 2, 3, 4 et même davantage; dans ce cas, la seconde pompe, placée à 10 ou 12 m au-dessus de la première, aspire l'eau que refoule celle-ci, et ainsi de suite. Ce système donne de bons résultats, mais à la condition que tous ces divers éléments soient identiques et marchent rigoureusement à la même vitesse; or, c'est là une condition que seul le moteur électrique permet de réaliser convenablement et économiquement.

Ainsi, supposons 4 pompes en série, le débit de 300 litres par minute et le refoulement de 45 m; on les actionne avec un moteur de 10 kw, par exemple, soit 120 volts et 80 ampères, faisant 1 600 tours, si on admet un rendement de 75 pour 100 pour les pompes.

Quand la hauteur d'épuisement est comprise entre 15 ou 30 m, on préfère généralement la *pompe rotative*. Mais, pour des profondeurs considérables, la *pompe à piston* s'impose et, dans ce cas, pour la commande électrique, on construit spécialement des pompes à quatre pistons plongeurs, dont trois pistons à eau et un piston d'équilibre des efforts.

Dans les charbonnages et quelques mines métalliques importantes, les pompes d'épuisement sont *souterraines*, et l'on s'efforce alors de les placer aussi profondément que possible, afin de n'avoir à actionner qu'une faible colonne d'aspiration. Or, les pompes à vapeur sont extrêmement coûteuses, car elles consomment, en moyenne, 10 à 12 kg de vapeur par cheval-heure effectif, en eau élevée, pour une marche normale et continue. Cette consommation atteint 14 ou 15 kg si la machine ne fonctionne que pendant douze heures et 16 ou 18 pour dix heures seulement.

Elles ont d'ailleurs beaucoup d'autres inconvénients; c'est, d'abord, la difficulté que présente toujours l'établissement d'une chambre souterraine spacieuse pour les recevoir; c'est encore l'encombrement des puits par les tuyauteries et les dommages causés par le passage des conduits de vapeur dans un compartiment particulier et, enfin, les pertes nombreuses, surtout pour les arrêts.

Les pompes électriques ont un meilleur rendement, elles sont plus simples d'installation et n'exigent pas un emplacement spécial et considérable. Mais leur commande est difficile, car les pompes, en général, marchent à des vitesses beaucoup moindres que celles des électromoteurs.

Le problème immédiat que se sont posé les constructeurs a donc été de fabriquer des

pompes capables de fonctionner à grande vitesse tout en conservant un bon rendement avec le même coefficient de sécurité. On est à peu près parvenu à obtenir des engins simples et robustes, peu encombrants et dont la vitesse, de 150 à 300 tours, concorde avec celle de l'électromoteur auquel dès lors ils peuvent être accouplés.

D'autre part, le mouvement du moteur électrique étant uniforme, il est nécessaire que la machine d'épuisement elle-même ait un débit régulier ; on a obtenu ce résultat en la composant de trois corps de pompe à simple effet commandés par un arbre muni de trois coudes à 120°, ou bien encore en employant deux systèmes, conjugués à 90°, de pompes différentielles, du type Riedler.

En somme, l'étude et la solution du problème d'épuisement des eaux dans une mine, en outre de la question assez complexe des profondeurs, sont assez compliquées. Il faut encore observer que, si la venue d'eau est constante, la pompe rencontre plus de facilités pour marcher uniformément, à une vitesse peu variable ; dans ce cas, il n'y a aucune difficulté à relier directement l'électromoteur à la canalisation électrique souterraine.

Si, au contraire, la venue d'eau varie beaucoup, on est obligé soit d'arrêter la pompe de temps en temps, soit de réduire la vitesse en introduisant des résistances dans le circuit, soit encore, ce qui est préférable, de faire usage d'une génératrice spéciale de courant avec des conducteurs séparés.

La solution la plus avantageuse est évidemment celle qui consiste à utiliser directement la ligne souterraine ; malheureusement, elle n'est pas toujours d'une application aisée.

De tout ce qui précède, il résulte qu'on ne saurait donner de règles précises pour la commande électrique des pompes et que chaque cas nécessite une étude spéciale.

Le seul point sur lequel tout le monde s'accorde, c'est que le démarrage de l'électromoteur doit absolument se faire dans la mine même et les raisons en sont nettement données par MM. Siemens et Halske, dans le journal *Die Electricität in Bergbau*, qu'ils ont publié pendant l'Exposition universelle de Paris :

« Si l'on considère, disent-ils, que l'arrêt n'est en définitive qu'une réduction de la vitesse à zéro et le démarrage un accroissement de la vitesse, il est néanmoins avantageux de munir l'électromoteur d'anneaux frotteurs ou d'un rhéostat de démarrage. Le prix d'achat ne sera que de très peu plus élevé que celui d'un moteur à induit fermé ; par contre, cette disposition présente une plus grande sécurité, car le mécanicien peut arrêter de suite son moteur, tandis que, dans l'autre cas, il est obligé de faire des signaux à la station centrale, d'où résultent une perte de temps et des inconvénients qui peuvent devenir sérieux.

« En outre, si plusieurs pompes sont alimentées par une même génératrice, cette dépendance peut causer de graves embarras ; supposons, par exemple, qu'une pompe étant en service, on veuille en mettre une seconde en marche, il faudra commencer par arrêter la première, puis les mettre en mouvement simultanément.

« Or, cette complication est évitée lorsque chaque électromoteur de pompes souterraines est installé dans la mine avec un appareil de démarrage ; on n'a plus alors à se préoccuper s'il est alimenté par la canalisation générale ou s'il est actionné par une génératrice spéciale. »

La Société Siemens et Halske construit, comme types courants pour pompes électriques, des moteurs W. D. dont les puissances varient de 50 à 700 chevaux, avec les vitesses suivantes : 242, 224, 208, 194, 182, 162, 145, 132, 121 et 95 t : m. Ces valeurs s'entendent pour les vitesses des moteurs fonctionnant à pleine charge avec des courants triphasés d'une fréquence de 50 périodes.

En général, les vitesses élevées se rapportent à des moteurs de faible puissance et les petites vitesses aux grands moteurs. Toutefois, chacun des modèles courants est adaptable aux autres vitesses, dans certaines limites ; ainsi un moteur de 80 chevaux peut marcher à l'une des vitesses comprises entre 242 et 145 tours ; mais le moteur de 500 chevaux et au-dessus peut être disposé pour marcher à l'une quelconque de ces vitesses.

Les anneaux frotteurs fixés sur l'axe de la partie mobile de l'électromoteur et servant à

établir la communication avec le rhéostat peuvent être entourés d'une boîte étanche lorsque cette protection est nécessaire.

Les types de pompes à commande électrique exposés, en 1900, par des maisons ou Sociétés de construction étaient assez nombreux. Nous en décrirons quelques-uns seulement.

**Pompe Ganz, de Budapest.** — La pompe électrique de la maison Ganz, de Budapest, est à trois plongeurs; elle fait 72 tours et élève 900 litres d'eau par minute.

Le diamètre des corps de pompe est de 0,17 m et la course de 0,21 m.

Le mouvement est communiqué par un électromoteur triphasé de 12 chevaux, muni d'anneaux de prise de courant et tournant à raison de 800 révolutions par minute.

Ce moteur porte un pignon à dents de cuir de 27 mm qui engrène avec une roue de 73 mm; celle-ci est montée sur un arbre intermédiaire servant de réducteur de vitesse. L'arbre est muni à son autre extrémité d'un pignon qui met en mouvement une roue d'engrenage fixée sur l'axe des manivelles des corps de pompe.

Le tout fonctionne sans bruit et dans de bonnes conditions de sécurité; la construction des divers organes est robuste et le rendement semble devoir être satisfaisant.

La pompe et son moteur sont disposés sur un socle de 3,05 m $\times$ 1,60 m, la hauteur maximum est de 1,43 m. L'ensemble occupe donc un espace restreint.

**Pompes souterraines des mines de Carmaux.** — Des pompes électriques ont été installées dans les trois puits de *la Grillatié*, de *la Tronquié* et de *Sainte-Marie*.

De la sous-station de la surface part un câble armé, à haut isolement, qui amène le courant à 5 000 volts dans une chambre souterraine aménagée pour cet objet et divisée en deux parties : dans l'une sont établis les transformateurs qui abaissent la tension de tout le courant destiné à être utilisé dans la mine, l'autre est réservée à la pompe d'épuisement avec les appareils de manœuvre et de mesure qu'elle comporte.

Dans chaque pompe, les pistons plongeurs de trois corps horizontaux, à simple effet, sont actionnés par un arbre trois fois coudé qui porte, à l'une de ses extrémités, une roue d'engrenage attaquée directement par le pignon de l'électromoteur.

Les pompes de la Grillatié et de Sainte-Marie refoulent chacune 60 m³ d'eau à l'heure, à une hauteur de 220 m qui, le cas échéant, est susceptible d'être portée à 300 m.

La pompe de la Tronquié élève 10 m³ à la hauteur de 350 m et éventuellement de 400.

La figure 6 indique l'installation de la pompe au puits de la Grillatié. Au niveau de l'étage 206 est ouvert un tronçon de galerie, de 2,50 m de hauteur, 2,50 m de largeur et 7,50 m de longueur, qui débouche dans une chambre mesurant 8 m de longueur, 3,50 m de largeur et 2,50 m de hauteur. Cette chambre est divisée en deux compartiments : dans l'un se trouvent les transformateurs T, le rhéostat R et le câble armé qui amène le courant; dans l'autre se trouve la pompe d'épuisement avec les tuyaux d'aspiration et de refoulement.

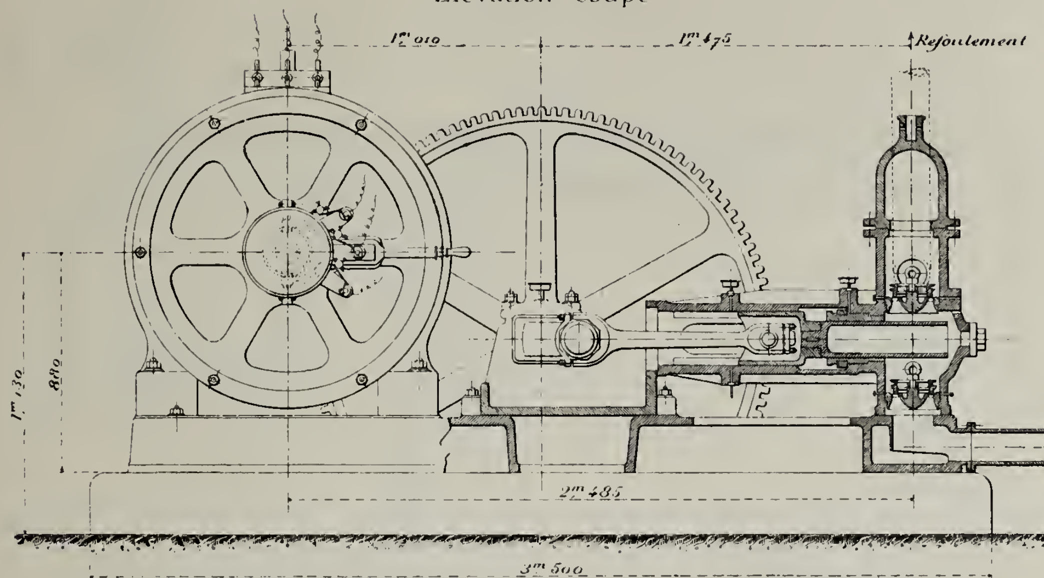
La surface occupée par la pompe est de 6,50 m² et la hauteur maximum est de 1,50 m.

**Pompe Galland, de Chalon-sur-Saône.** — La maison Galland construit des pompes électriques, à rotation, à trois plongeurs, pour refoulements jusqu'à 300 m, et dont la puissance varie de 8 à 100 chevaux.

La figure 7 indique le mode d'installation d'une pompe souterraine présentant les caractéristiques suivantes :

| | |
|---|---|
| Débit à l'heure | 100 m³ |
| Hauteur d'élévation | 200 m |
| Diamètre des plongeurs | 180 mm |
| Course — | 350 mm |
| Puissance de l'électromoteur | 100 chevaux |
| Nombre de tours de la pompe | 80 |
| Rapport des engrenages | 5 |
| Diamètre des tuyaux | 150 mm |

Le moteur est à courant triphasé et l'arbre des bielles des pompes porte un volant régulateur.



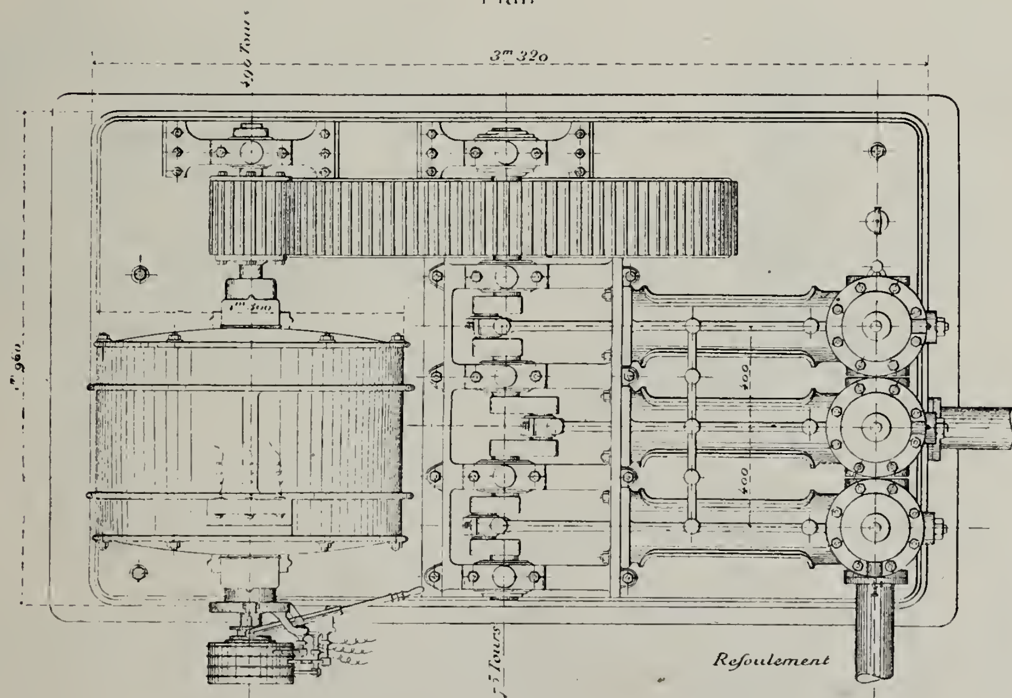




Fig. 6. — Pompe d'épuisement des mines de Carmaux.

Tous les principes signalés plus haut pour les dispositifs de la pompe et de l'électromoteur ont été rigoureusement observés.

**Pompe Express Riedler (Allemagne).** — La pompe Riedler, à piston plongeur, présente une disposition particulière dans les soupapes. La soupape d'aspiration, placée autour du piston,

se compose d'un simple anneau en métal ou en bois avec armature métallique; son siège est

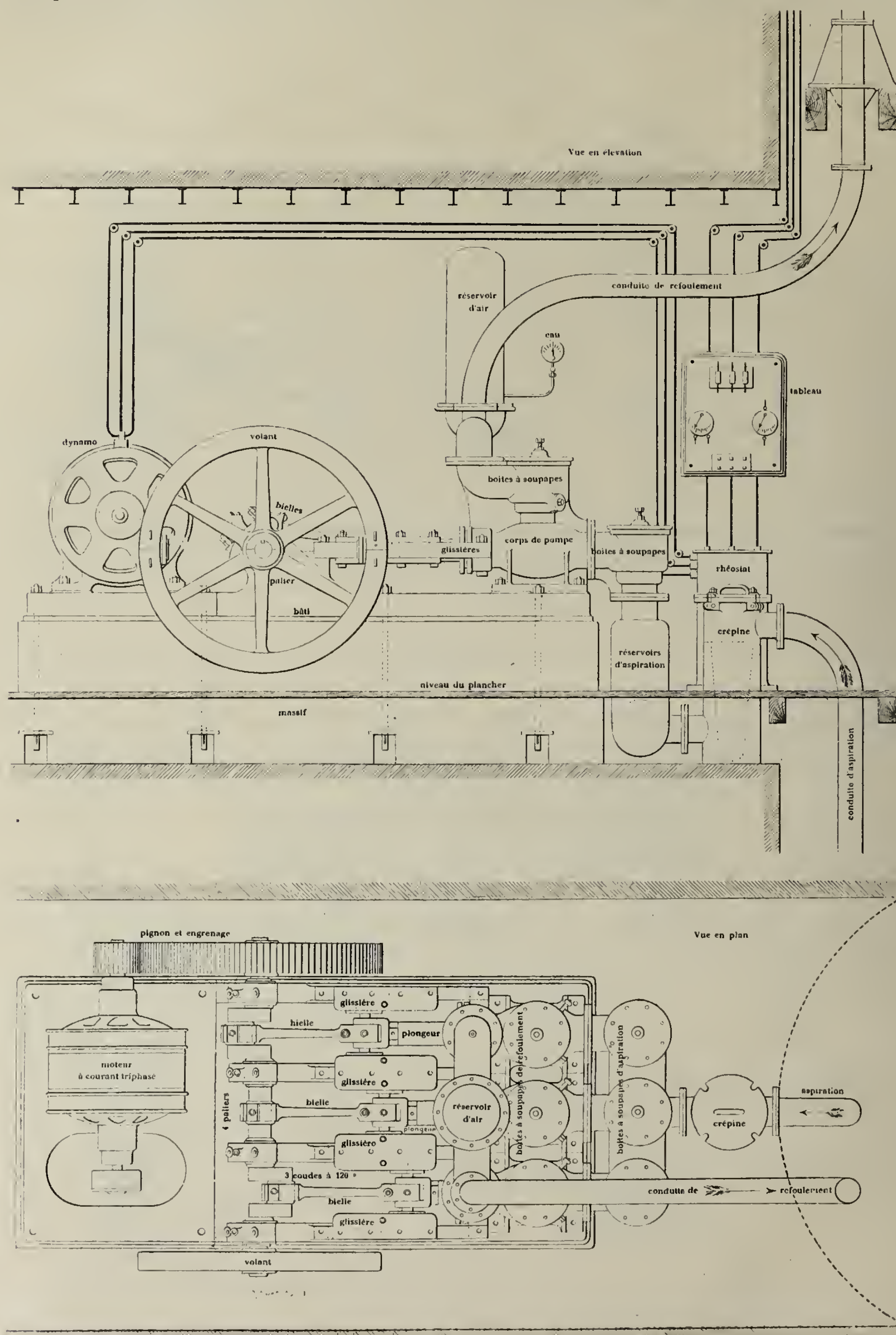



Fig. 7. — Pompe électrique Galland.

maintenu en place par des tiges qui servent de guides pour le mouvement. La soupape de refou-

lement se compose d'anneaux reposant sur le siège de la soupape et chargés par des ressorts en caoutchouc. Ces anneaux sont d'un remplacement très facile.

Pour un débit de 1 100 litres et une hauteur de refoulement de 270 m, la pompe est commandée par un moteur asynchrone triphasé de 75 chevaux, tournant à 290 t : m, sous la tension de 190 volts, la hauteur d'aspiration pouvant atteindre 5 m.

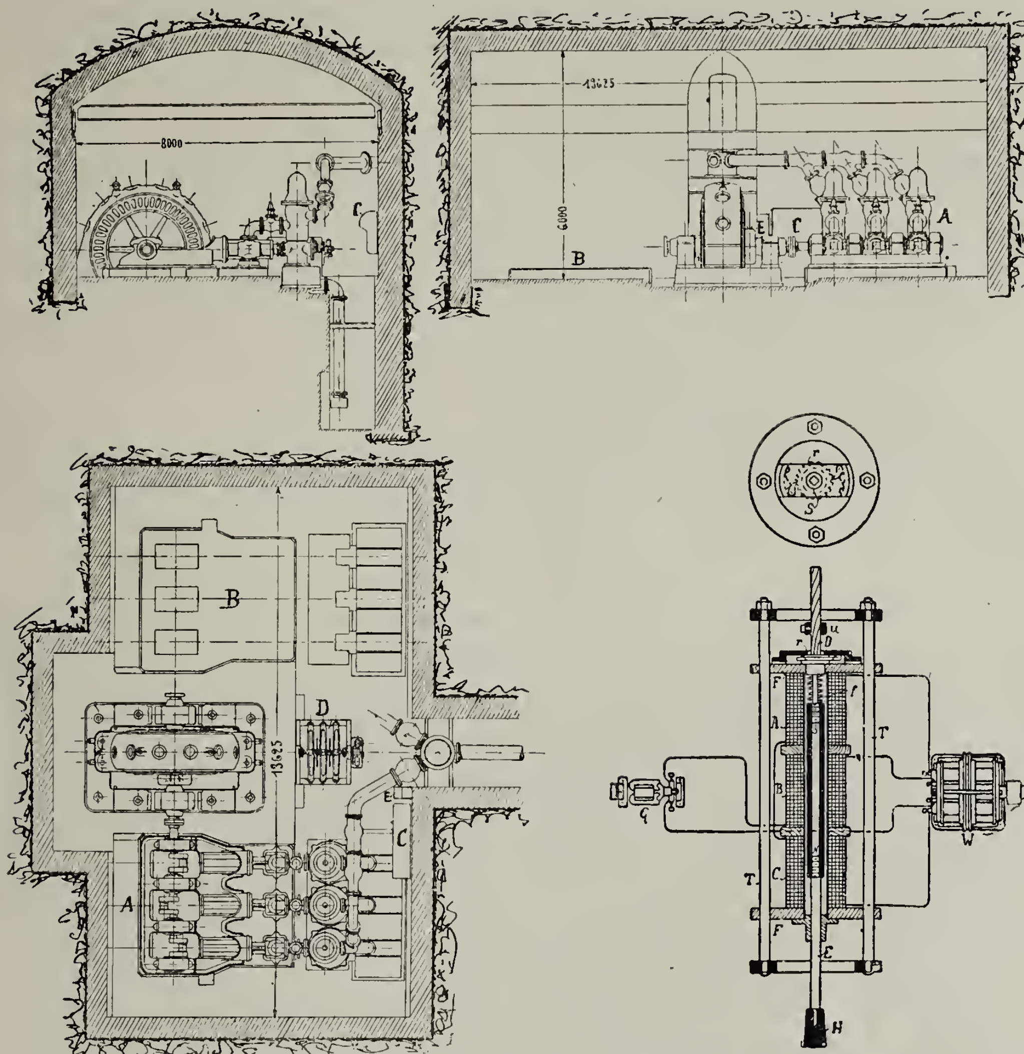



Fig. 8. — Pompe Riedler installée à la mine Ferdinand Grube (Silésie).

A, pompe en fonctionnement depuis 1899. — B, emplacement pour recevoir une seconde pompe semblable. C, tableau de distribution. — D, rhéostat. — E, régulateur.

La figure 8 représente l'installation d'une pompe express Riedler, construite par la *Maschinenbau-Anstalt C°, de Breslau*, pour l'épuisement des eaux de la mine *Ferdinand Grube*, en Silésie. Elle est placée dans une galerie souterraine.

Le débit est de 5 500 litres par minute, la hauteur de refoulement 300 m et la vitesse angulaire de 145 t : m.

La pompe fut essayée préalablement aux ateliers de Breslau, dans des conditions correspondant à celles qu'elle devait remplir à la mine. La vitesse de 145 tours fut ensuite augmentée graduellement jusqu'à 210, sans que cet effort extraordinaire causât le moindre dérangement. Une fois installée, elle a fonctionné deux ans, sans interruption, pendant vingt-trois heures chaque jour.

**Pompe Ehrhardt et Sehmer (Allemagne).** — La pompe Ehrhardt et Sehmer, à commande électrique, comprend trois pistons à plongeurs, à simple effet, qui reçoivent le mouvement d'un arbre à trois manivelles ; le même arbre actionne une petite pompe aspirant de l'huile dans une auge, formée par la partie inférieure du bâti, pour la refouler dans un système de conduits qui la distribuent aux divers organes à lubrifier.

Pour une pompe refoulant 1 000 à 1 200 litres d'eau par minute, à une hauteur de 250 à 350 m, les pistons ont un diamètre de 105 mm et une course de 200, leur vitesse angulaire est de 200 à 250 t : m ; elle est actionnée par un électromoteur triphasé de 75 chevaux, sous la tension de 500 volts.

**Pompe Haniel et Lueg.** — Citons, pour terminer, la pompe *Haniel et Lueg*, installée depuis 1897 aux charbonnages Zollverein, en Westphalie. C'est un groupe de deux pompes différentielles conjuguées, type Riedler ; l'arbre est mû directement par un moteur électrique triphasé, formant volant, alimenté par des courants à 1 000 volts.

La mise en marche du moteur s'opère directement de la surface en même temps que la génératrice, par excitation de celle-ci au moyen d'une dynamo à courant continu.

Le rendement de cette pompe est $\frac{T_e}{T_v} = 0,655$ :

$T_e$, — travail en eau élevée ;

$T_v$, — travail indiqué au moteur.

La machine motrice est une compound-tandem verticale ; elle attaque directement la dynamo à 142 tours et consomme 7 kg de vapeur par cheval indiqué. La consommation est donc $\frac{7}{0,655} = 10,65$ kg de vapeur par cheval-eau élevé.

### *b*). — EXTRACTION

L'introduction du courant électrique dans l'exploitation des mines n'a modifié en aucune façon la construction des treuils et machines d'extraction proprement dits.

On a simplement substitué la commande électrique à la vapeur ou à l'air comprimé.

Cette substitution a été tout d'abord hésitante, car le service de l'extraction constitue, pour ainsi dire, la cheville ouvrière d'une exploitation et toute perturbation dans son fonctionnement, si minime qu'elle soit, est de nature à entraver ou paralyser les autres services et à provoquer de graves accidents.

On comprend donc avec quelle réserve et quelle prudence cette application de l'électricité a été accueillie à ses débuts ; aujourd'hui on va plus volontiers de l'avant, car on a reconnu les avantages et l'économie du précieux agent.

En effet, s'il est vrai que les machines à vapeur se prêtent assez bien aux multiples exigences de l'extraction et présentent une certaine sécurité d'emploi, c'est aux dépens d'une consommation énorme de vapeur, avec une grande complication d'organes et par une rigoureuse surveillance de chaque instant. L'effort à vaincre pour la montée et la descente étant à tous moments variable et nécessitant par intermittence de grands afflux de vapeur, on ne peut employer la condensation que si l'on dispose de grandes surfaces refroidissantes et d'eau en quantité suffisante ; de plus, l'économie qui résulterait de la répartition de la détente sur plusieurs cylindres n'est pas applicable.

On sait encore que, pour la mise en marche, le mécanicien est obligé d'ouvrir complètement le robinet d'admission, afin de réduire autant que possible la période d'accélération ; puis, lorsque après quelques tours l'ascension va se terminer, la force vive qu'on a développée doit être absorbée par le frein ou par une marche à contre-vapeur.

Quant à emmagasiner et mettre en réserve l'énergie produite par la descente, on ne l'a jamais fait, car, seule, l'électricité peut en fournir les moyens par l'intermédiaire des accumulateurs.

Et ce n'est pas tout. Il faut que les cages s'arrêtent aux recettes sans secousses, qu'en

arrivant au jour leur vitesse soit amortie assez à temps pour qu'elles ne risquent pas d'être enlevées jusqu'aux molettes ; en un mot, il est de toute nécessité que la vitesse soit modifiable ou suppressible à volonté.

La montée aux molettes est une cause d'accidents graves ; on ne saurait la prévenir d'une façon certaine qu'en coupant automatiquement l'admission de vapeur, dès que la cage approche de la partie supérieure ; mais cette solution, si simple en apparence, est d'une réalisation fort difficile et on est obligé d'y suppléer par l'adoption de palliatifs, tel que : *avertissements*, *sonneries*, *appareils spéciaux dits évite-molettes*, etc.

Or, cette difficulté disparaît avec l'usage des électromoteurs, car on peut toujours supprimer automatiquement et immédiatement le courant au moment voulu.

La commande électrique a bien d'autres avantages ; elle permet de régler l'extraction avec toute la précision désirable, d'augmenter ou de ralentir à volonté la vitesse, d'arrêter la marche des cages sans chocs et presque instantanément.

De plus, comme la vitesse de l'électromoteur, continu ou triphasé, est déterminée par la tension du courant et la fréquence, son emballement n'est pas à redouter, puisque, dès que la vitesse dépasse une certaine limite, le moteur fonctionne comme une simple dynamo génératrice de courant. Enfin, la mise en marche aussi bien que les arrêts s'effectuent sans chocs.

Quand les machines d'extraction à vapeur sont éloignées des chaudières, il faut faire usage de longs tuyaux de conduite ; ceux-ci, outre qu'ils occasionnent de grandes pertes, par suite des condensations inévitables, présentent les plus sérieux inconvénients au point de vue de la sécurité, car ils sont exposés aux fuites, aux ruptures, etc. Il y a loin de ces difficultés de transport de la vapeur aux facilités et à la sécurité que procure la transmission du courant électrique au moyen de simples câbles conducteurs.

Les treuils à commande électrique peuvent être contrôlés à distance et le mécanicien-électricien tient lui-même sous sa surveillance immédiate tous les mouvements qui, dans le cas d'un treuil à vapeur, dépendent de signaux donnés par une autre personne, lesquels peuvent échapper à son attention ou être mal interprétés.

Il est bien évident que, si le treuil électrique est placé à une certaine distance de l'usine génératrice, le courant polyphasé s'impose ; le courant continu, au contraire, peut être adopté toutes les fois que le puits d'extraction est à proximité.

Le courant continu a d'ailleurs certains avantages particuliers bien connus et au sujet desquels il est inutile de revenir ; il permet, en outre, d'utiliser les énergies perdues pour charger des accumulateurs et ceux-ci fournissent le moyen de corriger les variations de charges et de marcher à charge constante. Cette opération se réalise sans dépense sensible, puisque la batterie d'accumulateurs, ce réservoir d'énergie, est chargée par le travail même des treuils.

L'électromoteur s'accouple directement au treuil dans les grandes installations ; dans les petites exploitations, on intercale un ou deux jeux d'engrenages.

Le treuil de Carmaux (*fig.* 9) reçoit son mouvement d'un électromoteur, par le moyen d'un arbre intermédiaire et de deux paires d'engrenages. Le bâti qui supporte le tambour et son moteur est formé de deux parties démontables, ce qui a permis de le descendre facilement dans les puits et de lui faire traverser les galeries.

Le pignon de l'électromoteur est en cuir et la roue correspondante en acier ; l'un et l'autre sont à denture droite, le second jeu d'engrenage est à denture à chevron.

Un commutateur unique dit *inverseur* permet d'obtenir, par la manœuvre d'une simple manette, le démarrage, l'arrêt et la marche arrière du tambour.

Comme mesure de sécurité, le tambour porte un frein à pédale normalement serré.

Le treuil de Carmaux a une puissance de 10 à 15 chevaux ; ses dimensions d'encombrement sont :

| | |
|---|---|
| Longueur...................................................... | 1,70 m |
| Largeur...................................................... | 1,60 m |
| Hauteur ...................................................... | 1,00 m |

En général, pour tous les petits treuils, la commande de mise en marche, d'arrêt et de

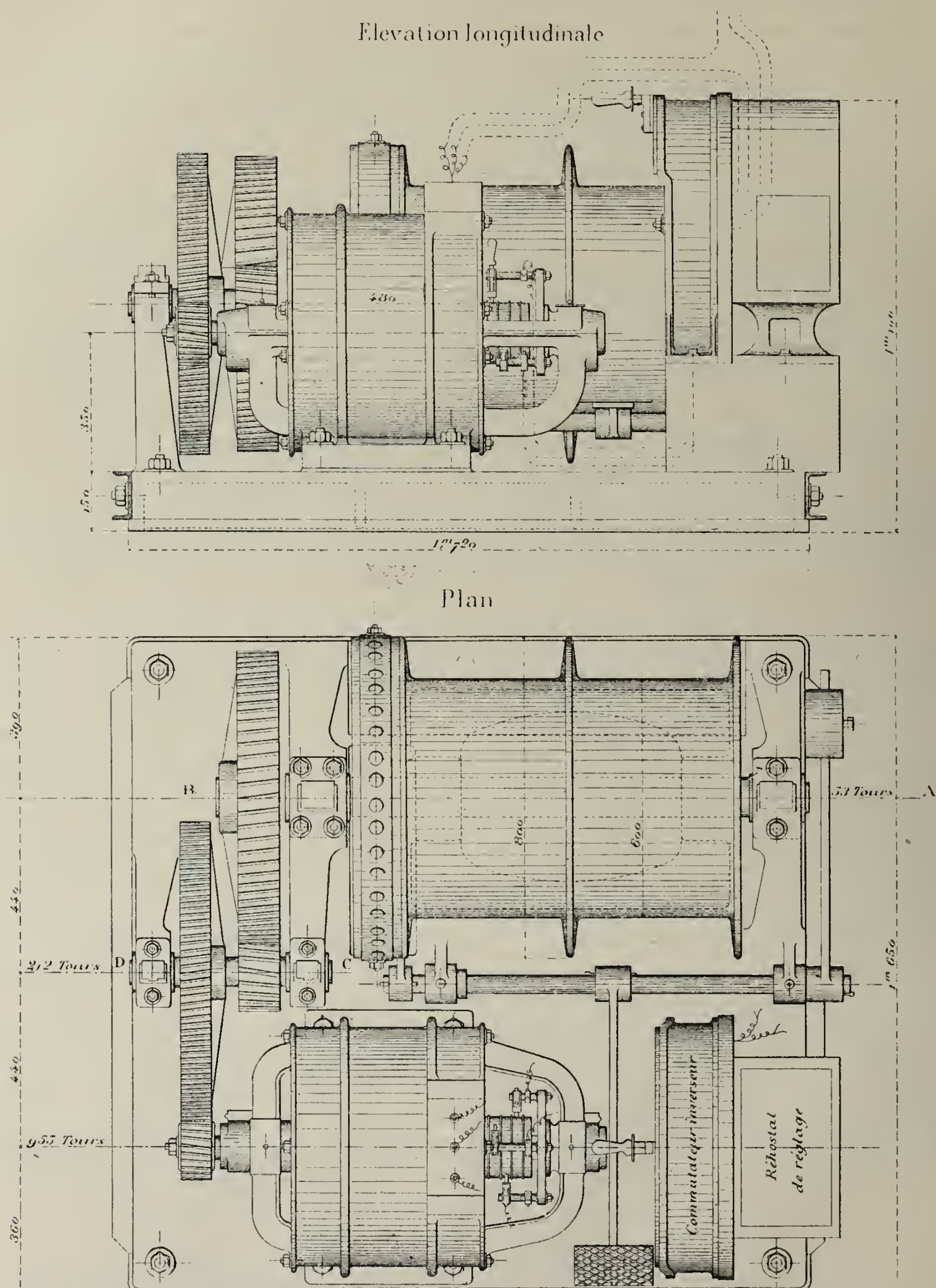



Fig. 9. — Treuil de 12 chevaux des mines de Carmaux.

renversement se fait à l'aide d'un seul et unique levier ; mais elle est beaucoup plus compliquée dans les grandes installations.

Ainsi, par exemple, la machine d'extraction [1] à courant alternatif de 400 chevaux, la plus puissante construite jusqu'à ce jour, pour le puits Erzherzog Albrecht, des mines de Karwin à Peterwald (Silésie autrichienne), qui sert à la fois à l'extraction et au transport des ouvriers, est munie d'appareils de sécurité spéciaux et présente les particularités suivantes :

1° Le levier de marche ne peut être actionné que lorsque le levier de renversement se trouve dans sa position extrême et non dans une position neutre moyenne;

2° Le levier de renversement ne peut se déplacer que lorsque le levier de mise en marche est hors circuit et jamais après qu'il a provoqué le mouvement du tambour;

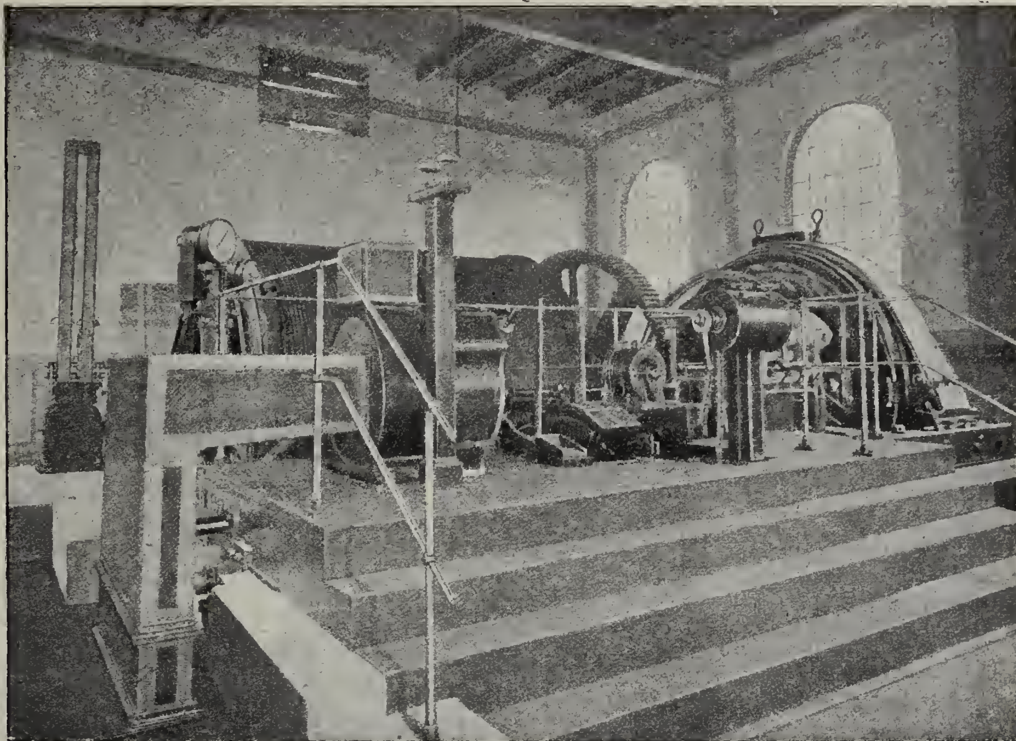


Fig. 10. — Machine d'extraction du puits Erzherzog Albrecht, à Peterwald (Silésie autrichienne).

3° Un *indicateur de profondeur* actionne le levier de marche, quand la cage est à 40 m du sol, de façon à le faire mouvoir en arrière, c'est-à-dire à arrêter la machine automatiquement;

4° Un seul levier à pédale permet d'arrêter les deux freins, chacun à quatre sabots, du tambour, ainsi que le frein à ruban, destiné à paralyser la grande force d'impulsion de l'induit;

5° La chute d'un contrepoids du frein met le moteur hors circuit automatiquement;

6° S'il se produit une rupture de conducteurs ou que les plombs de sûreté viennent à fondre, les contrepoids tombent et la machine s'arrête automatiquement, par suite du serrage instantané du frein;

7° Si la cage tend à dépasser la recette du jour, l'*indicateur de profondeur* dégage par une butée un poids qui provoque le serrage automatique du frein et qui, en outre, met le moteur hors circuit à l'aide d'un interrupteur spécial.

Le moteur a été construit par MM. Siemens et Halske; sa puissance est telle qu'il peut

1. *L'Électricité dans l'industrie minière*, par M. W. Vendeling, ingénieur en chef de la Société Siemens et Halske. (*Rapport présenté au Congrès International des Mines et de la Métallurgie*, en *juin* 1900.)

soulever la cage chargée et non équilibrée; elle équivaut, par conséquent, à la somme des poids de la cage et des wagonnets et du poids utile, diminuée du poids du câble. La commande a lieu par engrenage, une petite roue dentée en bronze et une grande en acier fondu (*fig.* 10).

Les données principales sont :

| | |
|---|---|
| Poids utile maximum par cage | 2 800 kg |
| Vitesse maximum d'extraction | 4,5 m |
| Profondeur du puits | 225 — |
| Diamètre des tambours | 3,5 — |
| Largeur — | 1,4 — |
| Vitesse angulaire du moteur de commande | 150 tours |
| Puissance de la machine en chevaux | 400 chevaux |
| Tension du courant triphasé | 12 000 volts |
| Longueur totale de la transmission | 9 000 m |

En résumé, l'extraction électrique présente plusieurs particularités d'un grand intérêt pour l'industrie des mines.

D'abord, elle donne un travail très régulier en corrigeant toutes les variations si fréquentes de charge, et ce résultat est acquis par l'intercalation de résistances convenables ou encore en emmagasinant les énergies perdues dans une batterie d'accumulateurs.

En second lieu, elle se prête aisément aux changements de marche par le simple renversement du courant à l'aide d'un levier-commutateur; celui-ci étant relié lui-même au frein dans le but de prévenir toute cause d'accidents.

Enfin, les emballements du moteur ne sont plus à redouter et on obtient son arrêt presque instantané, automatiquement et sans chocs.

### c). — PERFORATION MÉCANIQUE

La perforation mécanique s'effectue avec deux catégories d'appareils :

1° La *perforatrice rotative*, pour roches tendres et demi-dures;

2° La *perforatrice à percussion*, pour roches dures.

La transmission par le courant électrique d'un mouvement de rotation s'effectue sans aucune difficulté au moyen d'un électromoteur ordinaire; mais le mouvement de va-et-vient qui caractérise la perforatrice à percussion ne peut s'obtenir par le courant qu'à la condition d'employer des moteurs spécialement agencés pour cet objet. C'est ce dernier outillage que nous allons étudier et, plus particulièrement, les perforatrices à percussion exposées par la Société allemande Siemens et Halske, la maison française C. Bornet et la Société américaine *General Electric*, représentée à l'annexe de Vincennes par la Société française Thomson-Houston.

**Perforatrice électrique à percussion.** — Le mouvement de va-et-vient du fleuret percutant est obtenu au moyen d'un courant alternatif qui agit successivement sur deux solénoïdes entre lesquels se meut une pièce de fer forgé. Cette pièce, sorte de piston, commande le porte-outil d'une part et, de l'autre, une tige à rainures hélicoïdales, dont le déplacement imprime au fleuret le mouvement rotatif dont il a besoin pour se dégager et pour donner au trou de mine la forme cylindrique.

L'appareil est porté sur un tripode, une colonne ou un affût, selon que le travail doit être exécuté en carrière ou en galerie.

Toutes les perforatrices électriques sont basées sur ce principe, dont la conception est due à Werner Siemens, le fondateur de la célèbre maison allemande Siemens et Halske, qui a réalisé tant de progrès dans les applications du courant électrique aux travaux des mines.

La perforatrice à solénoïdes, brevetée en 1079 par W. Siemens, est composée de trois

bobines qui reçoivent un courant alternatif et communiquent un mouvement de va-et-vient à un noyau de fer doux ; deux bobines, aux extrémités, changent de pôles par le passage d'un courant polyphasé après chaque demi-période, tandis que la troisième bobine, placée au milieu, est traversée par un courant continu.

La figure 11 est un schéma de la perforatrice à solénoïdes.

Malgré ses nombreuses imperfections, cet appareil eut un certain succès en Amérique, où il avait été introduit, avec quelques modifications, par l'ingénieur hollandais Van de Poele. Il fut un peu plus tard perfectionné par l'ingénieur américain Marvin, qui supprima le solénoïde central.

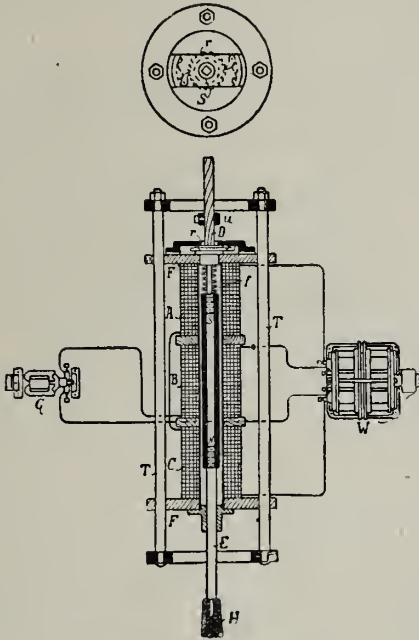


Fig. 11.
Schéma de la perforatrice à solénoïdes.

E, porte-outil. — NS, tige de fer doux. — A, C, solénoïdes des extrémités. — B, solénoïde central. — f, ressort de rappel du porte-outil.

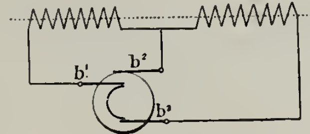



Fig. 12. — Schéma de la perforatrice Marvin.

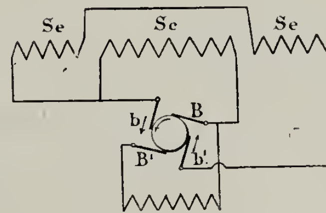



Fig. 13. — Schéma de la perforatrice Van de Poele.

La dynamo employée par Marvin pour actionner sa perforatrice est à courant alternatif. L'induit est formé de bobines en série dont les extrémités aboutissent à deux balais $b^1$ et $b^3$ fixés sur un demi-cercle métallique. Celui-ci est disposé à l'intérieur d'un cylindre portant un balai $b^2$ (*fig.* 12) relié au fil de connexion des deux solénoïdes. Grâce à cette disposition, le courant alternatif passe successivement dans chaque solénoïde et l'outil reçoit un mouvement de va-et-vient. Mais, comme ce mouvement est de même intensité dans les deux sens, il en résulte une dépense d'énergie qui est beaucoup trop grande pour le retour du porte-outil et, par suite, des chocs violents contre le ressort de rappel.

L'agencement préconisé par Van de Poele est le suivant. Le porte-outil glisse dans un manchon qui porte deux bobines à gros fil reliées entre elles par une bobine à fil fin ; la machine qui fournit des courants alternatifs et des courants oscillatoires est une dynamo à courant continu avec deux balais fixes B, B′ et deux balais tournants $b$ et $b'$ calés à 180° l'un de l'autre (*fig.* 13).

Le solénoïde à fil fin est relié aux balais B et $b$, et les deux balais mobiles $b$ et $b'$ sont en connexion avec les solénoïdes à gros fil. Avec cette disposition, on envoie un courant alternatif dans les deux solénoïdes extrêmes et un courant ondulatoire toujours de même sens dans le solénoïde central Sc qui les relie.

Quand le balai mobile $b$ occupe la position B, le courant ondulatoire est nul; celui-ci est maximum quand $b$ est en B′ pour redevenir nul en B.

Le mouvement d'aller est donné par le solénoïde S et celui de retour par les deux autres On obtient ainsi un choc percutant très violent et un rappel très doux avec une faible dépense d'énergie.

Le manchon des solénoïdes porte un ressort à chaque extrémité pour amortir les chocs dans les deux sens.

Malgré sa supériorité théorique, la perforatrice Van de Poele est moins pratique que celle de Marvin, parce qu'elle s'échauffe beaucoup plus par hystérésis et par l'effet des courants de Foucault, de sorte que la bobine à fil fin s'échauffe, brûle et demande fréquemment à être renouvelée.

**Perforatrice de la « General Electric C° ».** — Le type le mieux réussi des perforatrices électriques à solénoïdes est celui de la Société américaine *General Electric* de New-York.

Fig. 14. — Perforatrice à percussion de la General Electric C°.

Les deux solénoïdes sont placés à la suite l'un de l'autre dans un manchon protecteur en fer, armé de têtes en acier fondu solidement boulonnées qui maintiennent les bobines en position et en même temps servent de support au mécanisme de rotation, au piston, aux coussinets, etc.

Le piston en acier qui glisse entre les solénoïdes est terminé par des pièces de bronze, dont l'une reçoit le porte-outil, tandis que l'autre est munie d'une hélice qui permet de communiquer à l'ensemble un mouvement de rotation. Cette seconde pièce est engagée dans un chapeau à rebords sur lesquels s'appuie un solide ressort à boudin destiné à amortir les chocs de retour et faciliter le rappel du fleuret adapté au porte-outil.

L'avancement est obtenu à l'aide d'une vis, d'un écrou et d'une manivelle (*fig.* 14).

Le courant est amené par un câble souple à trois fils que l'on fixe à la face supérieure de l'appareil par un serrage à vis; sur le côté opposé est un collier de raccord avec un tripode ou un affût.

La dynamo spécialement destinée à la manœuvre de la perforatrice produit indifféremment du courant continu et du courant alternatif de faible fréquence.

Le courant alternatif est envoyé dans un électro-aimant, de façon que dans le temps $t$ il passe dans le solénoïde A, et du temps $t$ au temps $2t$ dans le solénoïde B. Dans ces conditions, le noyau ou piston placé entre les deux solénoïdes prend un mouvement de va-et-vient en conservant une aimantation de polarité constante.

Il est évident que le courant alternatif est plus avantageux, car il ne peut donner lieu qu'à

de très faibles étincelles, tandis que le courant continu en produirait de très violentes à chaque renversement de courant.

La dynamo est construite comme pour le courant continu ordinaire ; elle est tétrapolaire, et son induit est enroulé en tambour. Deux spires opposées étant reliées en tension, on recueille sur le collecteur I (*fig.* 15), avec deux balais calés à 90°, du courant continu à 220 volts qui sert à l'alimentation des conducteurs et peut, en outre, être utilisé pour l'éclairage.

Il faut ensuite transformer le courant continu en courant alternatif, puis opérer la commutation de ce dernier d'un solénoïde à l'autre aux instants mêmes où il s'annule. Et, comme on veut faire battre à l'outil 400 coups par minute, la fréquence du courant alternatif produit doit être très faible. On obtient ce résultat en réunissant les spires de l'induit à un second collec-

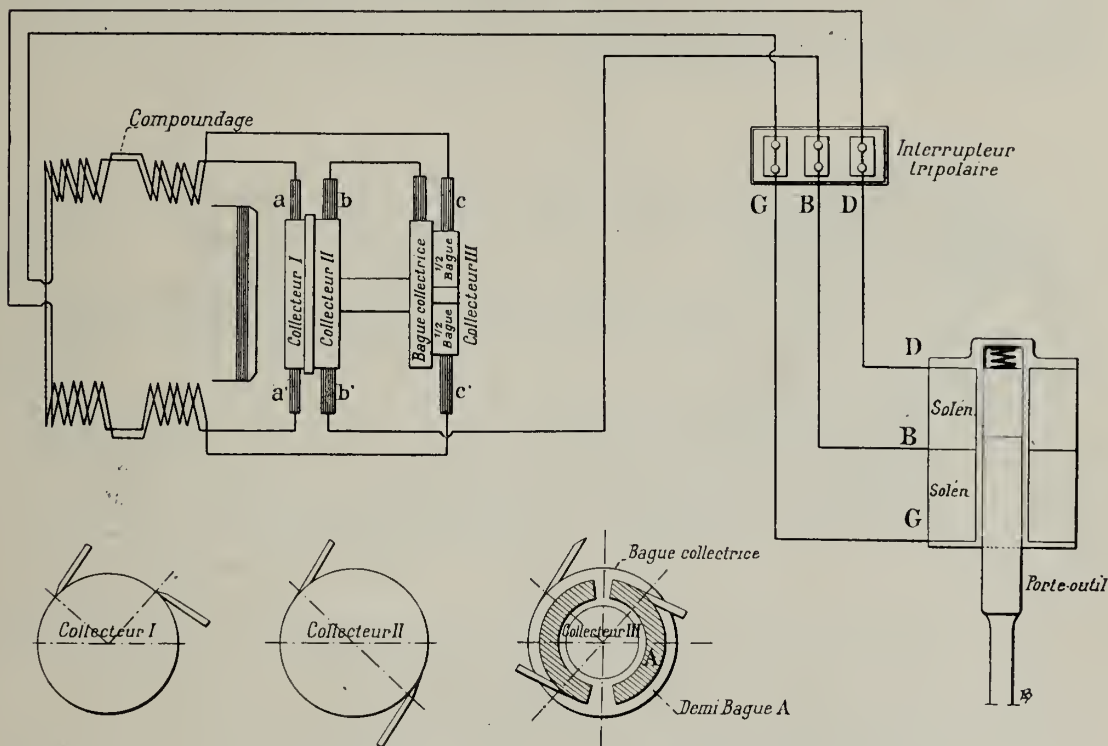



Fig. 15. — Schéma des connexions d'une dynamo à perforatrice.

teur II dont chaque touche correspond à un angle deux fois plus grand que le groupe de spires correspondantes et qui, par conséquent, doit posséder deux fois moins de touches que le collecteur I de courant continu.

Il est facile de comprendre, en effet, que le courant recueilli par les balais du collecteur II est du courant alternatif de fréquence deux fois plus faible que celui qui serait fourni par l'induit relié en deux de ses points à deux bagues collectrices.

On obtient ce courant alternatif avec une force électromotrice de 220 volts et une fréquence égale au nombre de tours de l'induit par seconde, grâce à l'artifice suivant :

Le collecteur II comporte N lames calées à l'angle $\frac{2\pi}{N}$; le collecteur I en a 2N calées à l'angle $\frac{2\pi}{2N}$.

Les lames 180° du collecteur I sont reliées à une lame du collecteur II.

Dans ces conditions, si $n$ désigne le nombre de lames passant sous les balais $aa'$ pendant une seconde, la vitesse angulaire sera égale à $\frac{2\pi}{2N}n$, et, comme les vitesses angulaires des deux

collecteurs I et II sont égales, il en résulte que sous les balais $b$, $b'$ passeront :

$$\frac{2\pi}{2N} n : \frac{2\pi}{N} = \frac{n}{2} \text{ lames par seconde.}$$

C'est donc comme si, doublant le nombre de lames du collecteur II et calant les balais à 90°, on faisait tourner ceux-ci dans le même sens que l'induit avec une vitesse moitié moindre ; or l'on sait qu'en faisant tourner les balais d'une machine à courant continu on obtient du courant alternatif.

Puisque les balais tournent avec une vitesse égale à la moitié de celle du collecteur, le nombre des périodes du courant par tour est égal à la moitié du nombre de paires de pôles. La dynamo étant tétrapolaire, le courant accomplira donc une période par tour et sa fréquence, pour 400 révolutions de l'induit par minute, sera :

$$\frac{400}{60} = 6{,}66.$$

Enfin, pour utiliser ce courant alternatif, le balai $b$ est relié par l'intermédiaire d'un frotteur et d'une bague collectrice à l'une des demi-bagues A du collecteur III sur lequel frottent deux balais à 180°.

Des fils venant des balais $c_1$, $c'$ vont former un enroulement compound autour des inducteurs et aboutissent aux bornes D et G des perforatrices ; la troisième borne B est reliée directement au balai $b'$.

L'utilisation du courant pour la perforatrice se fait ainsi :

Suivant que le frotteur appuie sur l'une ou l'autre des deux demi-bagues du collecteur III, le courant va à l'un ou l'autre solénoïde D et G, et les balais $c$ et $c'$ sont disposés de telle manière que la commutation produite dans le frotteur à cheval sur la séparation des deux demi-bagues ait lieu au moyen de l'annulation du courant alternatif. Autrement dit, le courant change de sens au moment où l'intensité est nulle, c'est-à-dire à l'instant où la commutation se fait sans étincelle.

Le compoundage des inducteurs a pour effet de supprimer les étincelles aux balais $a'$, $b'$, en renforçant le champ au moment précis de l'augmentation de la charge.

Ces dynamos spéciales se construisent pour batteries de 2, 4, 6, 8 et 10 perforatrices.

*Données principales des dynamos tétrapolaires à 400 révolutions :*

| Puissance de la dynamo. | Poids. | Nombre de perforatrices. |
|---|---|---|
| 6 kilowatts | 1 000 kg | 2 |
| 12 — | 1 500 — | 4 |
| 18 — | 2 100 — | 6 |
| 24 — | 2 500 — | 8 |
| 30 — | 2 750 — | 10 |

| | |
|---|---|
| Poids de la perforatrice | 75 kg |
| — de la colonne-affût | 150 — |
| — d'un tripode avec contrepoids | 150 — |
| — de 35 mètres de câble souple armé, à 3 conducteurs | 150 — |
| Puissance en chevaux, par perforatrice | 4 à 5 chevaux |

La figure 16 représente une dynamo tétrapolaire de 18 chevaux pouvant actionner une batterie de six perforatrices.

**Inconvénients des perforatrices électriques à solénoïdes.** — Les perforatrices à solénoïdes sont simples de construction et de manœuvre, mais elles présentent d'assez graves inconvénients.

D'abord elles demandent à être actionnées par un moteur spécial, de sorte qu'on ne peut pas les intercaler dans un courant continu ou alternatif quelconque. En outre, elles ne trans-

mettent au fleuret qu'une faible partie du travail qu'elles absorbent, le reste étant inutilement transformé en chaleur; leur rendement est donc faible, de sorte qu'elles donnent de mauvais résultats en roche très dure, où, contrairement au cas des roches de moyenne dureté, qui demandent un battage fréquent, il faut un battage plus lent, mais très puissant.

Une bonne perforatrice à air comprimé, *Éclipse* ou *Ingersoll*, pour roches très dures, ne bat que 300 coups, mais avec une force estimée à 340 ou 350 kg environ.

D'autre part, l'outil absorbe une si grande quantité de chaleur qu'il faut le changer toutes les deux ou trois heures et même, malgré cette précaution, les bobines brûlent fréquemment.

Un autre inconvénient à signaler, c'est qu'il y a souvent coinçage dans le trou de mine, parce que la force de rappel de l'outil est insuffisante; pour dégager le fleuret, l'ouvrier doit frapper à coups de marteau.

Ajoutons encore que les chocs répétés finissent par donner aux pièces de bronze une texture cristalline qui les rend cassantes.

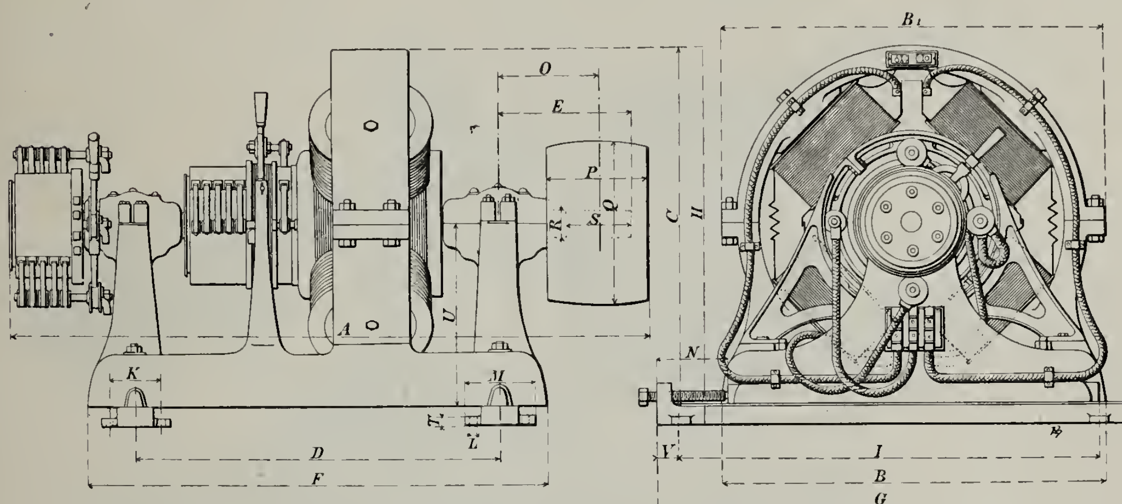


Fig. 16. — Dynamo tétrapolaire de 18 chevaux pour batterie de 6 perforatrices.

Actuellement, on tend à délaisser la perforatrice à solénoïdes, lorsqu'il s'agit de travaux en roches dures, et on lui préfère les appareils où le courant électrique, agissant simplement comme force motrice, communique le mouvement au porte-outil par l'intermédiaire de *cames* ou de *ressorts*. Dans le premier cas, la percussion est donnée par un piston à came (perforatrice Dulait) ; dans le second cas, on constitue une sorte de marteau-frappeur, dont les battages sont allongés par l'élasticité de ressorts métalliques (perforatrice Siemens), ou avec chambres d'air formant ressorts (perforatrice Bornet).

**Perforatrice Dulait.** — La perforatrice électrique à percussion Dulait se compose d'un manchon traversé par le piston porte-outil et continué à l'arrière par une longue tige filetée; celle-ci est munie d'un écrou à glissière portant un galet G qui bute contre une came C à laquelle on imprime un rapide mouvement de rotation (*fig.* 17).

A sa partie antérieure, le manchon est armé d'un ressort P qui est comprimé par le mouvement de la came et provoque ainsi le va-et-vient du porte-outil.

Pour amortir les chocs de la came sur le galet, l'arbre de la came porte un volant régulateur V formé de deux parties réunies entre elles par des ressorts.

Comme on le voit, le mouvement de percussion seul est automatique, le double mouvement d'avancement et de rotation du fleuret s'opère au moyen d'un volant à main M et du pas de vis P, le moyeu du volant est muni d'une cale longitudinale qui s'engage dans une rainure de l'extrémité filetée du porte-outil et peut tourner avec lui.

La came motrice est calée sur un arbre qui, par l'intermédiaire de pignons R et R', reçoit son mouvement d'un flexible, et celui-ci est actionné par un petit moteur électrique porté sur un truck distinct de la perforatrice ou sur l'affût de celle-ci (*fig.* 18).

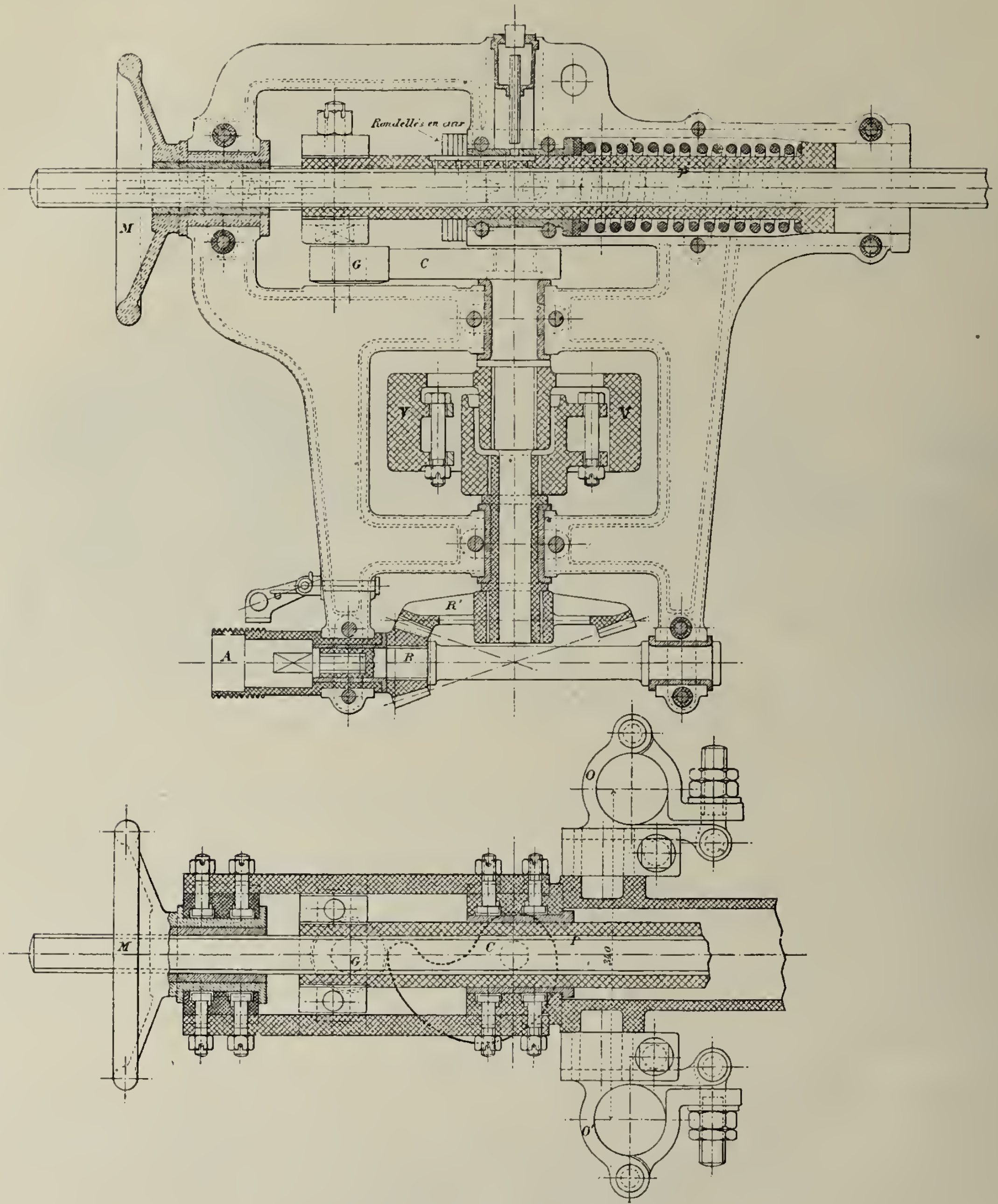



Fig. 17. — Perforatrice Dulait.

Le flexible s'échauffe beaucoup, il doit être très surveillé; de plus, il convient de le maintenir, autant que possible, en ligne droite.

Le moteur tourne à 1 300 tours et se construit indifféremment, selon les circonstances de la mine, pour courant continu ou alternatif. Avec une génératrice de 120 volts, sa tension est de 90 à 95 à la distance de 2 500 m (charbonnages belges de Courcelles, Nord), avec un câble de 20 mm² de section.

La puissance consommée par la perforatrice est :

$$12^{a} \times 90^{v} = 1{,}08 \text{ kw},$$

soit 1,5 cheval environ.

Le type de perforatrice qui convient aux roches de dureté moyennne pèse avec l'affût 130 kg et bat 420 coups à la minute, avec un ressort de 80 kg et un moteur de 1,5 cheval.

La perforatrice pour roches dures pèse 267 kg et bat 400 coups, avec un ressort de 120 à 180 kg et un moteur de 4 chevaux.

Les perforatrices à cames présentent des inconvénients ; si on décompose le mouvement, on voit que la came, en agissant sur le galet, repousse en arrière le porte-outil, lequel, chassé par le ressort, revient en avant dès que la came a changé de sens. Or, si la perforatrice a son fleuret dirigé vers le bas, le poids du piston porte-outil agit dans le même sens que le ressort

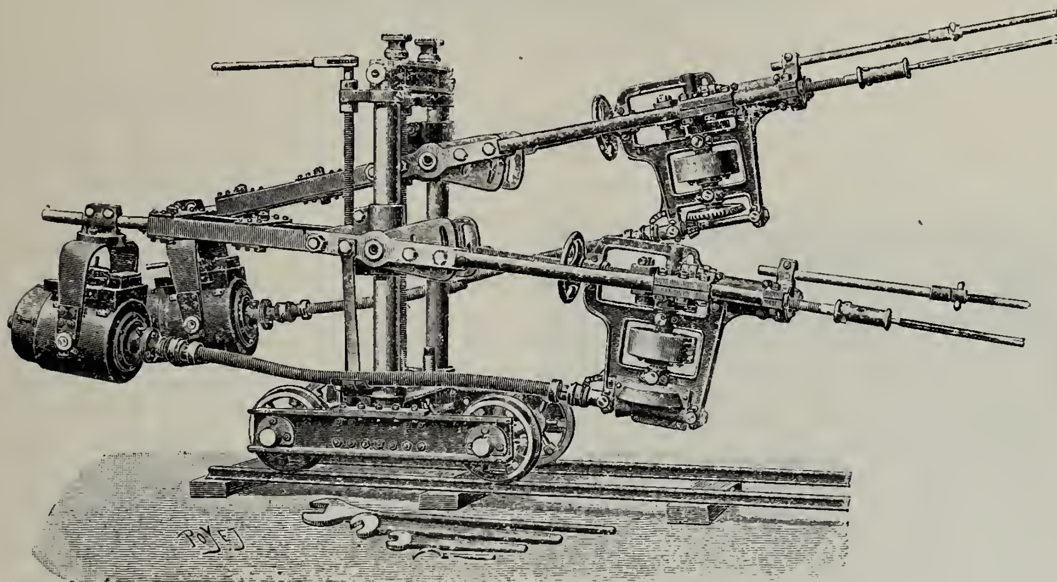


Fig. 18. — Batterie de deux perforatrices « Dulait-Forget ».

dont il favorise ainsi l'action. Si, au contraire, la perforatrice travaille vers le toit, les deux effets se retranchent et le résultat n'en est plus que la différence. La perforatrice à cames travaille donc moins bien de haut en bas, ce qui est un défaut capital dans les opérations de perforation en galeries.

D'autre part, son fonctionnement exige un synchronisme absolu entre le mouvement de la came, c'est-à-dire du moteur, et le mouvement propre du porte-outil lorsqu'il est repoussé par le ressort ; sinon il se produit des contre-coups entre la came et le galet, qui, dès lors, s'use rapidement.

Enfin, si le fleuret bat à vide dans une fente ou crevasse accidentelle, ou encore s'il reste coincé, il se produit une rupture, à moins que le moteur ne s'arrête sur-le-champ.

**Perforatrice à came-manivelle Siemens et Halske.** — MM. Siemens et Halske ont cherché à remédier à toutes ces défectuosités.

Leur perforatrice, qu'ils appellent encore *marteau à ressort*, comprend une longue vis $f$ et une manivelle qui sert à l'avancement du chariot $cc$ (*fig.* 19). Entre les extrémités de ce chariot sont bandés deux puissants ressorts à boudin, d'une force de 800 kg, et disposés de telle façon qu'à la compression de l'une correspond la détente de l'autre, par l'interposition, entre les deux, d'une bride $d$ qui commande le porte-outil $e$.

Le mouvement de va-et-vient est donné par une petite manivelle à bouton *b*, qui joue le rôle de la came dans la perforatrice Dulait. Elle est commandée par des engrenages et le bouton

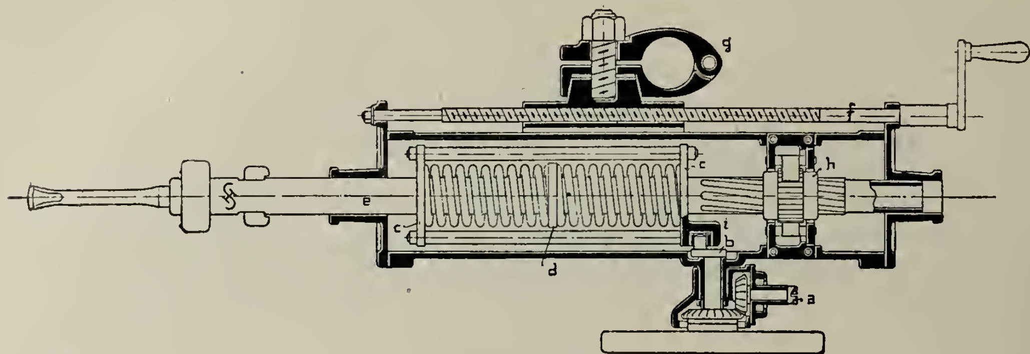



FIG. 19. — Perforatrice à percussion Siemens et Halske.

actionne une boîte en bronze *i* ajustée à l'arrière du chariot; le déplacement du chariot est de 0,04 m; mais, comme il se produit à grande vitesse, 7 coups par seconde, le porte-outil, sous l'effet des ressorts et de la masse, est lancé jusqu'à 0,07 m et même 0,08 m.

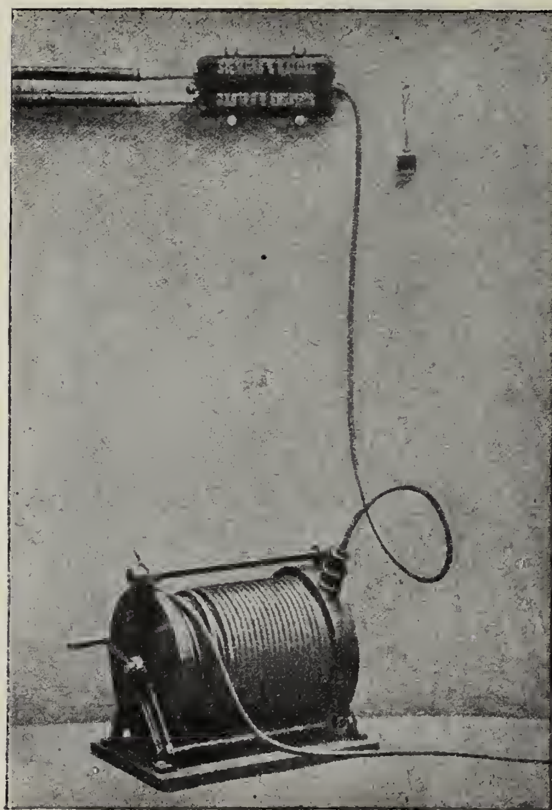


FIG. 20. — Moteur électrique commandant la perforatrice Siemens et Halske.

La rotation du fleuret est automatique et s'effectue à l'aide d'un écrou à rochet et d'un filet de vis hélicoïdale, tracé sur l'arrière du piston porte-outil.

Le moteur, qui commande les engrenages par un flexible ajustable sur la tête B, est la partie la plus intéressante de l'appareil. C'est une petite dynamo ordinaire logée dans une caisse portative à laquelle on ajuste le flexible de la perforatrice, et qu'on met en connexion avec la ligne de la mine par l'intermédiaire d'une boîte de prise de courant et d'un tambour à câble (*fig.* 20).

Suivant les circonstances et la nature des courants dont on dispose à la mine, on fait usage d'un moteur à courant continu ou à courant triphasé (*fig.* 21 et 22). On combine les engrenages pour telle ou telle vitesse, de sorte que la perforatrice peut être actionnée par un courant quelconque emprunté à un réseau quelconque, d'éclairage ou de transmission d'énergie.

Dans le cas du courant continu, les tensions qui conviennent varient de 110 à 220 volts, avec 50 périodes par seconde; si le courant est alternatif, il doit être de 120 ou 210 volts avec le même nombre de périodes, 50 par seconde.

Il ne faut pas dépasser 210 volts, avec un courant triphasé, une tension supérieure pouvant être dangereuse pour des appareils aussi faciles à déplacer que les caisses de moteur.

Si donc le courant dont on dispose est à trop haute tension, on le réduit à 120 volts à l'entrée du chantier au moyen d'un transformateur.

La variation de courant ne dépasse pas 50 pour 100 avec le moteur à courant continu et 10 pour 100 avec l'autre; il importe, pour le bon fonctionnement d'une perforatrice à percussion, que le battage des coups ne varie pas de plus de 8 pour 100.

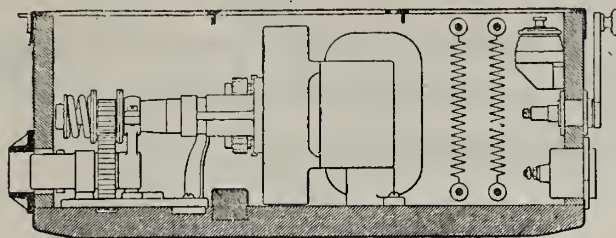


Fig. 21. — Moteur à courant continu dans sa caisse.

Données de la perforatrice Siemens-Halske :

| | |
|---|---|
| Poids du moteur et de sa caisse | 110 kg |
| — de 2,50 m de flexible | 25 — |
| — de la perforatrice seule | 90 — |
| — du volant | 20 — |
| Nombre de coups battus par minute | 400 à 450 |
| Puissance en chevaux | 2 chevaux |

Il faut compter 12 chevaux pour une batterie de six perforatrices.

Cette machine est moins simple que celle de la *General Electric C°*, mais elle donne un meilleur rendement.

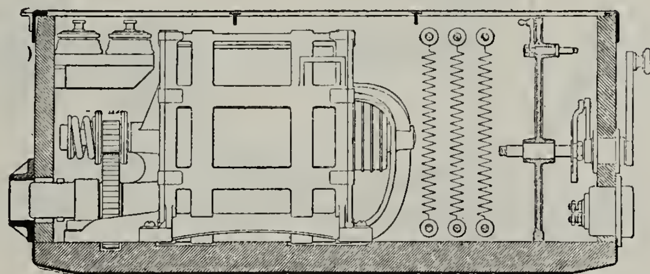


Fig. 22. — Moteur à courants triphasés dans sa caisse.

Elle travaille bien dans tous les sens, sans chocs nuisibles; lorsque le fleuret se coince, il ne se produit pas d'arrêt, et le chariot exécute seul son mouvement de va-et-vient. Toutefois, les coincements sont rares, car l'outil reçoit à peu près la même impulsion à l'aller comme au retour.

Mais elle a les défauts inhérents à l'emploi des ressorts métalliques, qui sont constamment exposés à se casser, et, pas plus que les autres perforatrices électriques, elle ne peut travailler économiquement en roches très dures et en roches manquant d'homogénéité.

**Perforatrice Bornet.** — C'est pour éviter les défectuosités inhérentes aux ressorts métalliques que M. Bornet les a remplacés par des coussins d'air.

Le mouvement de percussion est obtenu par l'intermédiaire d'un arbre coudé, commandant un piston. Celui-ci se meut dans un cylindre monté sur l'arrière du porte-outil, auquel il est relié par deux chambres d'air (*fig.* 23). L'air remplace les ressorts et forme la liaison élas-

tique nécessaire entre le piston, qui est animé d'un mouvement régulier de va-et-vient, et le cylindre percuteur, dont la course varie à chaque instant.

La translation et la rotation du fleuret sont données à la manière ordinaire.

Une supériorité de la perforatrice Bornet consiste en l'injection d'eau au fond du trou de mine par le centre du fleuret. Cette injection se fait par un ingénieux artifice ; à l'avant se

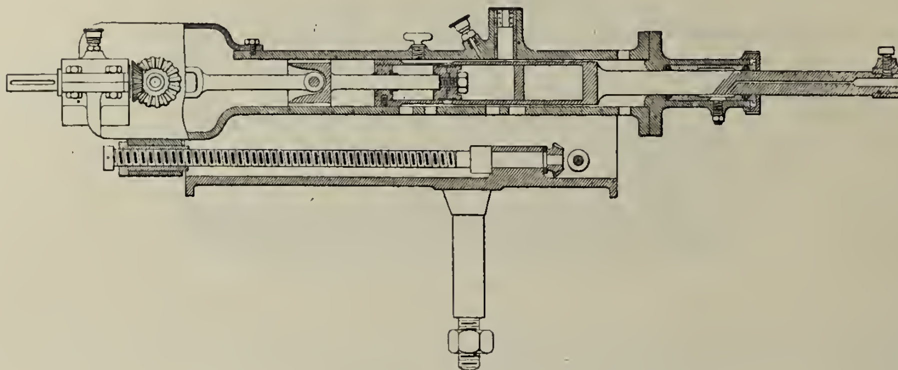


Fig. 23. — Perforatrice à percussion, système Bornet.

trouve un manchon d'acier à revêtement intérieur de bronze : c'est la *chambre d'eau*. Elle est traversée par la tige creuse du porte-outil. A chaque battement, la tige prend dans ce réservoir de l'eau sous pression de 3 kg, et l'envoie au fond du trou pendant la percussion.

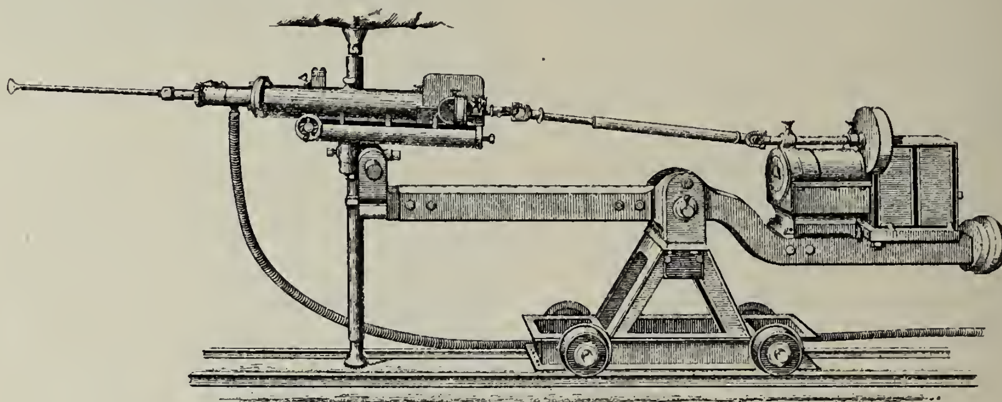


Fig. 24. — Perforatrice Bornet et son moteur.

Chaque perforatrice est actionnée par un flexible et porte, équilibré sur l'affût, un petit moteur triphasé. La figure 24 montre la liaison du moteur et de l'appareil.

*Données relatives aux perforatrices à percussion, système Bornet :*

| | |
|---|---|
| Poids du moteur | 125 kg |
| — du flexible | 25 — |
| — de la perforatrice avec injecteur d'eau | 125 — |
| Puissance en chevaux | 2 chevaux |
| Nombre de coups battus par seconde | 300 |

**Avantages et rendement des perforatrices électriques.** — Nous avons déjà indiqué les avantages comme les défauts de chacun des types actuellement employés pour la perforation en utilisant le courant électrique. Il reste à parler de leur rendement.

L'établissement d'un rendement industriel pour de semblables appareils et, par suite, leur comparaison au point de vue pratique et économique est fort difficile. On peut bien déterminer

la quantité d'énergie consommée par le moteur, mais on ne peut faire que des évaluations approximatives en ce qui concerne celle qui est utilisée en fragmentation de la roche par le taillant du fleuret.

Voici quelques indications fournies à ce sujet par la maison Siemens et Halske [1] :

TRAVAIL DE PERFORATION DES ROCHES

| NATURE DES APPAREILS ET DE LA ROCHE | TRAVAIL ET RENDEMENT DANS LE TROU DE MINE | | CONSOMMATION D'ÉNERGIE A 1 OU 2 KM DE DISTANCE | | RENDEMENT FINAL |
|---|---|---|---|---|---|
| | en cm3 par minute | en kilogrammètres par seconde | en chevaux | en kilogrammètres par seconde | pour 100 |
| 1° Par rotation en roche moyennement dure : | | | | | |
| Perforatrice à bras | 80 | 6 | » | » | » |
| Perforatrice rotative électrique de S. et H. | 600 | 45 | 1,7 | 125 | 36 |
| 2° Par percussion en roche dure : | | | | | |
| Travail à la main, par homme | 4 | 2,4 | » | » | » |
| Perforatrice électrique à percussion de S. et H. | 50 | 30 | 1,7 | 125 | 24 |
| — — — à solénoïdes. | 45 | 27 | 6 | 450 | 6 |
| — à percussion, par l'air comprimé | 45 | 27 | 10 | 750 | 3,6 |

Quoique ces chiffres ne présentent qu'une certitude relative, on peut voir néanmoins combien le rendement total est minime à la distance de 1 ou 2 km.

En admettant ces données, il faudrait un travail de 4,5 kgm par seconde pour broyer 1 cm³ de roche de moyenne dureté comme le sel gemme, et 36 kgm pour une roche dure comme le granit ; de sorte que le rapport des résistances au broyage de ces deux types de roches serait $\frac{1}{8}$.

Mais, il faut le répéter, la comparaison des perforatrices et des divers modes de perforation est difficile à établir. Il apparaît cependant que la perforatrice mécanique n'est avantageuse que si on peut en mettre au moins deux ou trois en batterie, ce qui n'est possible que dans les grandes galeries ou dans les tunnels. Les galeries ordinaires de mine n'ont jamais plus de 1,80 m à 2 m de largeur et, dans ces conditions, surtout si la roche est très dure, c'est encore le *battage à la main* qu'il faut préférer.

Lorsque l'on peut faire agir plusieurs perforatrices sur le même front de taille, la rapidité de la perforation électrique est réellement importante. Quant à son économie, elle n'apparaît pas encore nettement. En effet, les organes de ces appareils s'usent et se brisent souvent, de sorte que, si des visites fréquentes ne sont pas faites pour pourvoir au remplacement immédiat des pièces avariées, les frais d'entretien et de réparation deviennent considérables.

Cependant, lorsque l'on arrive à former des équipes d'excellents et habiles ouvriers, la casse des ressorts est moins grande et il suffit de désarmer chaque perforatrice tous les trois ou quatre jours pour l'examiner en détail et graisser ses organes.

Quant au moteur ou à la caisse portative, on peut, avec quelques précautions, les conserver en activité pendant un mois et même davantage, sans visites ni réparations.

**Haveuses électriques.** — L'application de l'électricité aux *haveuses* ne comporte d'autre disposition que la substitution d'un électromoteur à la commande par l'air comprimé. Les seuls appareils de ce genre remarqués à l'Exposition sont :

La *haveuse à chaîne* Jeffrey ;

La *haveuse à chaîne* Morgan-Gardner ;

La *haveuse perforatrice* de MM. Colin et Daubiné.

1. *Die Electricität in Bergbau, — Gesteins bohrmaschinen.* — Berlin, 1900.

### d). — TRACTION PAR LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES

La locomotive adoptée pour la traction dans les mines diffère essentiellement de la locomotive électrique de tramway. D'abord, elle doit être construite pour circuler dans des atmosphères particulières où l'on trouve des poussières nombreuses, beaucoup d'humidité et souvent des gaz inflammables; elle doit, en outre, répondre à des desiderata très spéciaux et que l'on peut résumer ainsi :

*Parcourir des voies étroites et basses à des vitesses extrêmement variables ;*

*Remorquer des poids très lourds ;*

*Présenter une grande robustesse d'organes pour résister aux chocs, aux chutes des toits, aux embarras fréquents sur les rails, etc. ;*

*Être facile et simple à manœuvrer, avec des leviers de frein et de manœuvre à la portée immédiate du mécanicien ;*

*Offrir un contrôle rapide et sûr ;*

*Enfin, se prêter aussi bien aux services des galeries souterraines qu'à ceux du jour.*

Les voies de mine sont toujours plus ou moins tortueuses et inégales, les embarras y sont fréquents; il est donc indispensable que le mécanicien puisse modifier immédiatement les conditions de marche et de vitesse en trouvant facilement, à la portée de sa main, tous les leviers et barres de manœuvres. Il faut encore, en raison de l'humidité constante qui rend les rails glissants, qu'il dispose de trémies à sable sur les deux côtés de sa machine.

En principe, la locomotive de mines comporte un robuste châssis de fonte pour recevoir es essieux et le moteur, avec une suspension à ressorts de voiture ou à ressorts en spirale; une place est réservée au mécanicien, soit à l'extrémité, soit au centre de la machine, selon qu'il doit être plus ou moins efficacement protégé.

Le courant est fourni par un trolley aérien ou par accumulateurs.

Les essieux sont commandés par l'intermédiaire d'engrenages. Naturellement la puissance du moteur électrique dépend de l'écartement de la voie. Elle est de :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 15 à 25 chevaux, | pour une voie de | ........ | 40 à 50 |
| 30 à 40 — | — | ........ | 50 à 60 |
| 40 à 60 — | — | ........ | 60 à 70 |
| 60 à 80 — | — | ........ | 70 à 1 m |

Si la voie n'a pas plus de 40 à 50 cm d'écartement, le moteur ne peut pas être installé entre les roues; on le dispose alors au-dessus des essieux et on ajoute une commande intermédiaire.

Quant à la locomotive, son poids varie de 2 à 20 tonnes, selon le poids des rails et l'écartement de la voie.

Ainsi, pour des rails de 4 kg, on adoptera la petite locomotive de 2 tonnes; elle sera de 6 à 8 tonnes pour des rails de 10 à 12 kg, et une locomotive de 6 tonnes présenterait des caractéristiques telles que les suivantes, par exemple :

| | |
|---|---|
| 2 moteurs, chacun ........ | 15 à 20 chevaux |
| Vitesse ........ | 10 à 15 km |
| Largeur minimum ........ | 1,25 à 1,30 m |
| Hauteur — ........ | 0,90 à 1,00 m |
| Longueur — ........ | 2,70 à 3,00 m |
| Diamètre des roues ........ | 0,70 à 0,80 cm |

Le choix d'une locomotive de mine dépend de la largeur et du profil des voies, des charges à remorquer, des rayons de courbure minima, du genre de wagonnets employés, de

l'état atmosphérique dans les galeries souterraines, etc. Les rampes ne doivent pas dépasser 3 à 4 pour 100.

On se pose encore le problème suivant : la traction se fera-t-elle par ligne aérienne ou par accumulateurs et, dans ce dernier cas, ceux-ci seront-ils portés par la locomotive elle-même ou par un truck remorqué ?

Les locomotives électriques de mines les plus remarquées à l'Exposition de 1900 étaient celles de *Siemens et Halske*, de la *Electricitäts Aktiengesellschaft* de Nuremberg, de la *General Electric C°* de New-York, de *Jeffrey*, des *mines de Nœux*, des *mines de Marles*.

**Locomotive de la General Electric C°.** — La locomotive de la Compagnie américaine *The General Electric C°*, exposée à Vincennes, dans la section Thomson-Houston, est une des plus simples et des plus robustes; elle est à voie aérienne, avec trolley.



Fig. 25. — Locomotive électrique de 6,5 tonnes des mines de Mount Pleasant (États-Unis).

Le type dénommé T.M.M.15. est condensé de façon à réunir les divers mécanismes dans le plus petit espace possible, et à mettre sous la main du wattman tous les appareils nécessaires aux manœuvres et au contrôle.

Les roues, portées sur deux essieux, mesurent 0,80 m de diamètre; elles sont attaquées, à l'aide d'une transmission à simple engrenage, par deux moteurs cuirassés entre lesquels on a placé les résistances de réglage et de démarrage. Un coupleur rhéostatique est muni de deux manettes, l'une de renversement de marche, l'autre de commande des circuits, disposées à la hauteur des bras du wattman assis.

Un volant commande, par une chaîne, une robuste timonnerie qui permet de serrer énergiquement huit sabots de freins sur les roues. Enfin deux manettes commandent deux sablières à l'avant et deux autres à l'arrière pour faciliter le démarrage ou empêcher le patinage.

Un trolley à perche et roulette peut tourner sans effort autour de l'axe vertical de son support et se déplacer en tendant ou comprimant des ressorts, jusqu'à venir toucher la partie supérieure du bâti, qui ne dépasse pas la hauteur de 0,80 mm.

La figure 25 montre la locomotive électrique qui fonctionne au charbonnage de *Mount Pleasant*, à Scranton (États-Unis); elle a une puissance de 160 chevaux et pèse 6,5 tonnes,

Elle circule sur 1 350 m de parcours et remorque 250 tonnes de charbon par jour au prix de 0,13 fr par tonne. Ce service exigerait 15 mules et 7 charretiers et une dépense de 0,40 fr par tonne.

**Locomotive de la Electricitäts Aktiengesellschaft (anciennement Schuckert und C°).** — Cette locomotive est également à trolley, mais du genre losange.

La figure 26 représente celle qui est actuellement en service aux charbonnages de Lota (Chili); elle est utilisée dans les galeries souterraines et au jour.

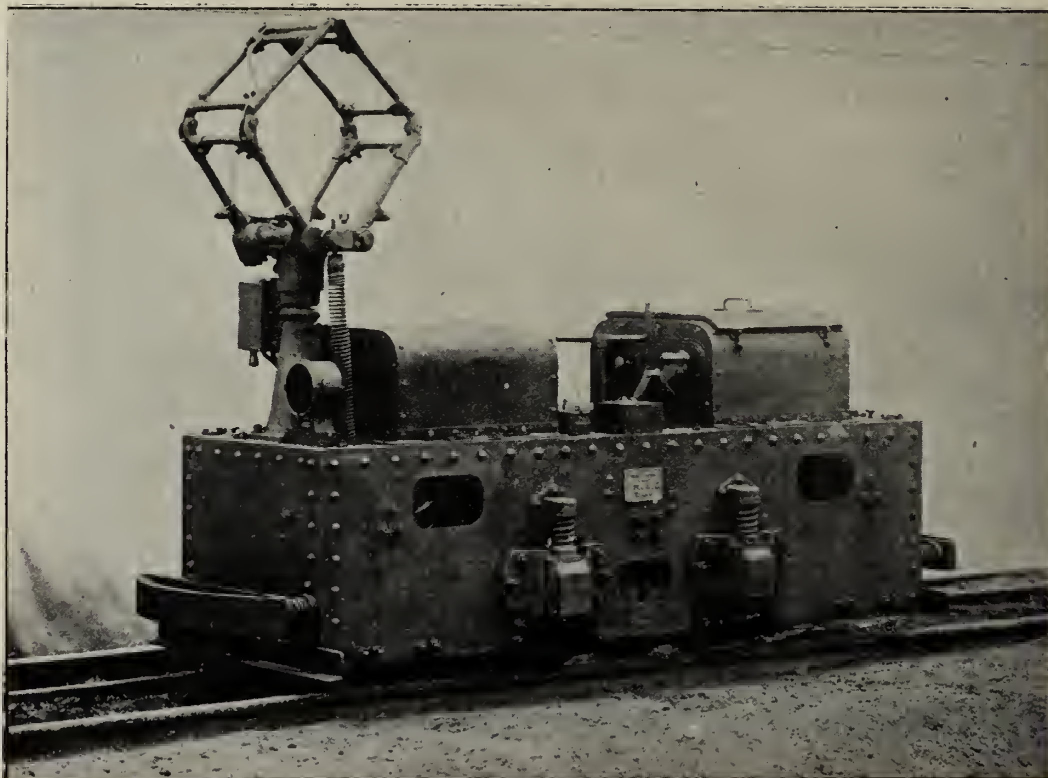


Fig. 26. — Locomotive électrique Schuckert des charbonnages de Lota (Chili).

Caractéristiques principales :

| | |
|---|---|
| Poids de la locomotive | 2 1/2 tonnes |
| 2 moteurs de | 15 chevaux |
| Effort de traction aux roues motrices | 180 kg |
| Vitesse, à l'heure | 10 à 11 km |

**Locomotive de Nœux.** — La locomotive électrique construite par la Société alsacienne de Constructions mécaniques, pour les mines de Nœux (Pas-de-Calais), est à accumulateurs du type Tudor à charge rapide.

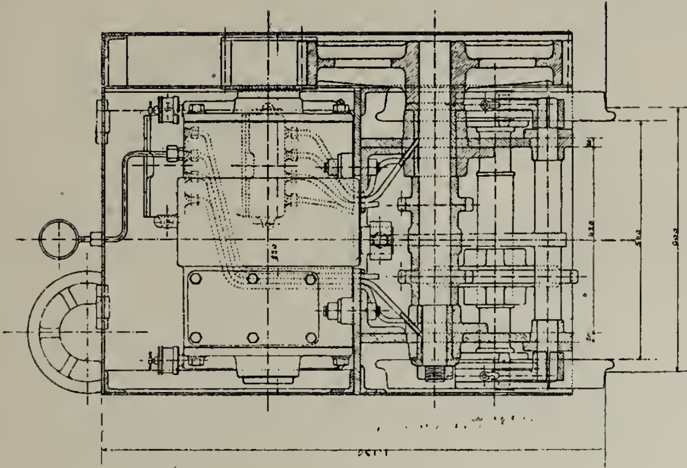
Les conditions imposées au constructeur étaient les suivantes :

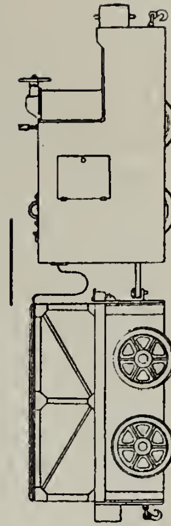
1° *Remorquer, à la vitesse de* 11 *à* 12 *km, un convoi de* 20 *à* 25 *berlines vides, du poids de* 280 *kg chacune, sur une rampe de* 8 *mm par mètre, et le même convoi chargé de* 500 *kg de charbon par berline sur une pente de* 8 *mm avec une vitesse de* 12 *km à l'heure ;*

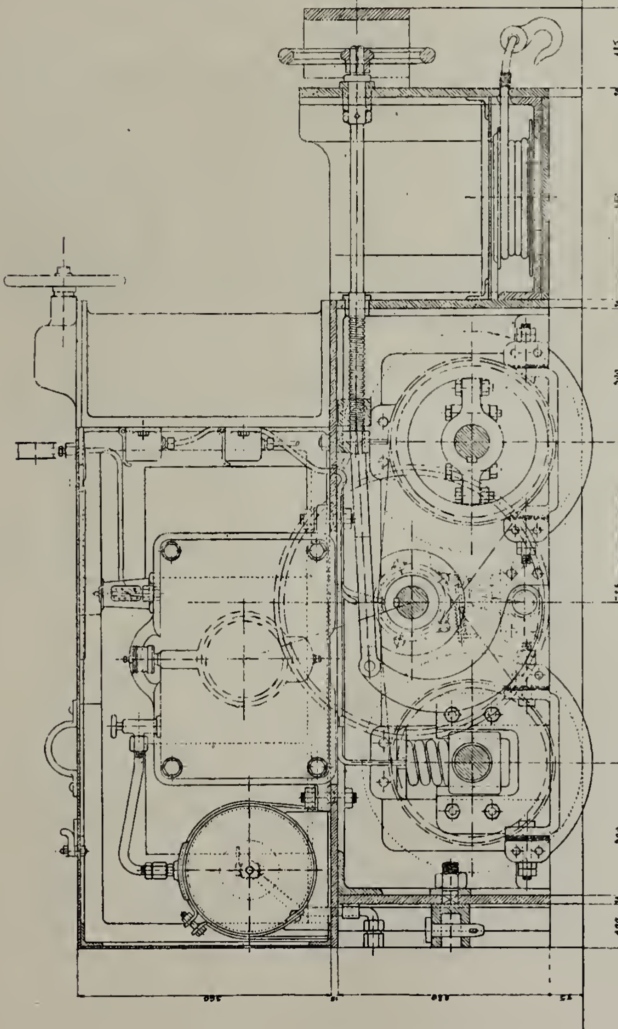
2° *Effectuer un parcours de* 6 *km, aller et retour, sans recharger la batterie d'accumulateurs ;*

3° *Entrer aisément dans les cages actuellement en service.*

Comme il était impossible, au point de vue du poids, de l'encombrement et des manœuvres



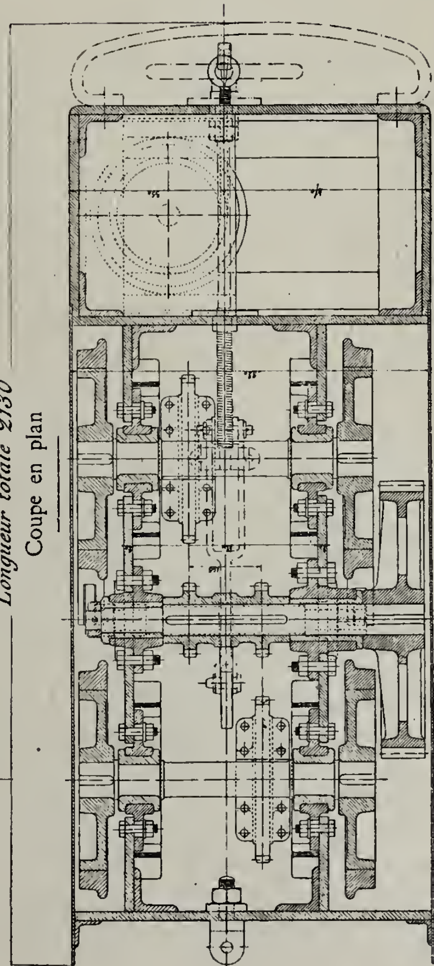




Fig. 27. — Détails de construction de la locomotive électrique des mines de Nœux.

pour la recharge, de loger la batterie sur la locomotive, celle-ci est portée sur un truck spécial.

Caractéristiques de la locomotive de Nœux :

| | |
|---|---|
| Puissance du moteur | 20 chevaux |
| Tension aux bornes | 100 volts |
| Nombre de tours du moteur | 850 |
| Diamètre au contact des roues | 500 mm |
| Vitesse en kilomètres | 11,5 |
| Poids de la locomotive seule | 2 850 kg |
| Poids par essieu | 1 425 — |
| Ecartement de la voie | 600 mm |
| Poids des rails par mètre | 12 kg |

Batterie d'accumulateurs :

| | |
|---|---|
| Nombre d'éléments | 51 |
| Capacité de régime en ampères-heure | 60 |
| Intensité au début de la charge (130 volts) | 180 ampères |
| — à la fin — (130 volts) | 70 ampères |
| Durée de la recharge | 30 minutes |
| Poids du truck et de la caisse vide | 1 500 kg |
| Poids d'un élément | 30 — |
| Poids du truck complet en ordre de marche | 3 030 — |

La figure 27 donne les détails de construction de la locomotive.

Le moteur attaque, par un pignon en cuir et un engrenage, un arbre intermédiaire qui transmet le mouvement aux deux essieux à l'aide de deux chaînes de Galle.

Le moteur est à 4 pôles, avec balais en charbon.

L'ensemble du moteur constitue un réservoir étanche en acier, très robuste, renfermant le collecteur et les balais; aucune rentrée d'air grisouteux n'est possible, car l'enveloppe contient toujours de l'air comprimé à une pression de 1/2 à 2 kilogrammes. Pour cet objet, la locomotive porte, derrière le moteur, un petit réservoir cylindrique en tôle que l'on remplit de temps à autre, à l'accrochage, d'air comprimé à 5 ou 6 kg, pris sur les conduites du fond ; la tubulure pour le remplissage est munie d'un clapet de retenue.

L'intérieur du moteur est mis en communication avec le réservoir à l'aide d'un petit tuyau et d'un robinet. Une soupape de sûreté limite la pression de l'air dans l'intérieur du moteur et un manomètre, à portée du mécanicien, indique si la pression est toujours effective.

L'arbre moteur traverse l'enveloppe dans un presse-étoupe.

Un coupleur, dont le volant de manœuvre est à côté du mécanicien, permet de renverser le sens de la marche du moteur et d'introduire des résistances pour produire quatre vitesses différentes dans les deux sens de la marche. Les résistances et les touches du coupleur sont enfermées dans des boîtes en fonte étanches et baignées dans de l'huile de vaseline.

Un frein puissant dont le volant de manœuvre est également à la portée du wattman permet d'arrêter très rapidement le convoi.

Un interrupteur automatique, renfermé dans une boîte en fonte remplie d'huile, limite l'intensité du courant et remplace avantageusement le coupe-circuit fusible qu'on ne pouvait adopter.

Enfin, à l'avant de la locomotive, comme à l'arrière du truck qu'elle remorque, l'attelage avec les berlines se fait au moyen d'un crochet ou d'un anneau fixé à l'extrémité d'un câble souple en acier, lequel s'enroule autour d'un tambour à ressort lorsqu'il est abandonné à lui-même. Ce dispositif permet de décrocher rapidement la locomotive du train quand elle arrive près de l'accrochage, ou de l'aiguiller sur une voie de garage en laissant filer le train sur la voie principale en raison de la vitesse acquise ou par suite de la pente.

---

II

## APPLICATIONS A LA MARINE

PAR Georges DARY ET A. BAINVILLE

---

### TOURELLE ÉLECTRIQUE SCHNEIDER-CANET

Dans le colossal bâtiment édifié en forme de tourelle, sur les bords de la Seine, par les usines du Creusot, MM. Schneider et C^ie avaient exposé tout le matériel de tourelles de marine actionnées électriquement.

Afin d'obtenir la quasi-perfection dans le pointage, afin que cette lourde masse, canon et tourelle, puisse tourner à différentes vitesses, s'arrêter, se mouvoir de nouveau à volonté, à droite, à gauche, pour que toutes ces opérations puissent s'effectuer aisément, il fallait que plusieurs conditions principales soient scrupuleusement remplies. La tourelle devait non seulement suivre dans le sens indiqué le déplacement d'un levier de commande, mais encore tourner avec une vitesse proportionnelle à l'angle décrit, en passant successivement et rapidement du repos à la vitesse maximum désirée ; de même, la tourelle devait pouvoir donner des déplacements extrêmement petits pour arriver finalement par un effet inverse à l'arrêt complet et instantané, sans choc, sans produire aucun trouble; il fallait enfin qu'elle s'arrêtât automatiquement à l'extrémité de sa course, dans chacune des deux directions.

Les tourelles Canet obéissent merveilleusement à toutes ces actions. Les variations de vitesse sont données par l'arrangement convenable d'un rhéostat contenant les résistances nécessaires, correspondant à des variations progressives dans la marche des moteurs.

Grâce à un dispositif spécial, pour des écarts très faibles du même levier, les moteurs se mettent en marche et reçoivent des impulsions successives dans le sens indiqué.

Par l'intermédiaire d'une clé d'arrêt électro-magnétique, le courant est interrompu automatiquement à l'aide de tampons de choc placés, deux par tourelle, en dessous du pont cuirassé et tout le système est soudainement immobilisé. Ces tampons ont, en effet, pour but d'assurer l'arrêt de la tourelle quand elle parcourt la distance maximum à droite ou à gauche, c'est-à-dire quand elle atteint l'angle limite de pointage. Ils comprennent chacun un cylindre de matière isolante dans lequel glisse, axialement, une tige métallique maintenue en avant par des ressorts et en contact avec une petite bande de métal fixée dans le cylindre lui-même, de manière à fermer ou encore à interrompre le circuit quand, actionnée par un butoir tournant avec la tourelle, la tige est repoussée à l'intérieur du cylindre malgré l'action des ressorts. Il résulte de cette disposition que, si rapide que soit l'arrêt, il n'est jamais brusque et que, par suite, aucun choc ne se produit; enfin, grâce à la mise en court-circuit des moteurs, la vitesse d'inertie est annulée.

Toutes ces opérations variées qui se sont produites par un déplacement du levier se font également en sens inverse, les connexions étant automatiquement renversées par le retour du levier au point de repos.

Le pointeur obtiendra donc à tous moments, par un simple déplacement du levier de commande, la ligne de mire qu'il désire; mais, quelque rapide que soit cette manœuvre, il faut ajou-

ter que la tourelle ne pourra s'arrêter précisément au point choisi ; il faudra corriger le pointage par de petits déplacements angulaires successifs.

Dans chaque tourelle, sous la main du chef pointeur, se trouve une boîte cylindrique avec une manette-levier ; c'est l'appareil de mise en marche, l'appareil de commande, le régulateur, enfin, qui remplit ici des fonctions analogues au « coupleur » des tramways électriques. Cet appareil, appelé du nom caractéristique de *cartouche électrique*, est dû à MM. Canet et Hillairet et il est représenté en coupe par la figure 1 ; quelques détails supplémentaires sont donnés par le schéma (*fig.* 2).

La cartouche électrique renferme principalement un commutateur d'arrêt relié électriquement aux tampons de choc, un commutateur inducteur pour la mise en marche des moteurs, une clé d'arrêt électro-magnétique, un bras portant des pièces de contact pour la mise en court-circuit des moteurs, un ressort pour ramener les connexions à leur position normale, enfin un dernier commutateur et un rhéostat composé de bobines plates placées l'une sur l'autre.

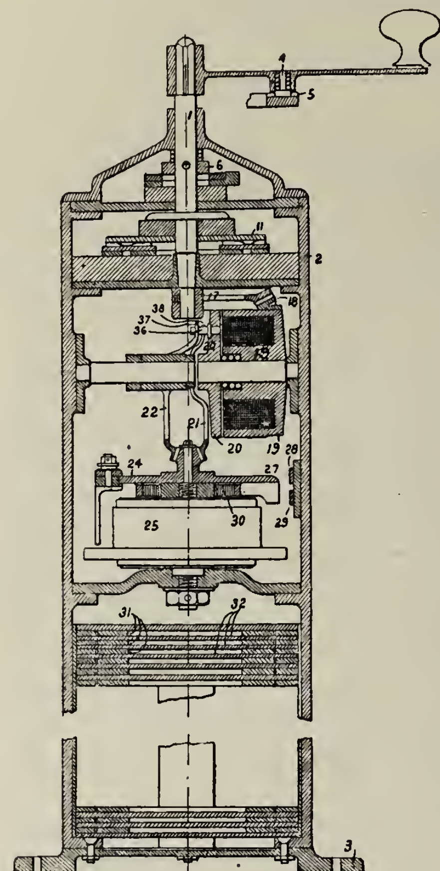


Fig. 1. — Cartouche électrique.

Le tout est enfermé dans une enveloppe cylindrique de fonte 2, boulonnée à la base 3 et portant un couvercle de tôle mince. A la partie supérieure, un collier embrasse la tige centrale 1 ; cette tige peut se mouvoir, à l'aide d'une poignée munie d'un ressort 4, avec un encliquetage d'arrêt tombant dans les entailles du cercle 5 ; cet arrêt peut glisser sur ces entailles, mais aussi y être maintenu, de manière à établir les connexions intérieures correspondantes.

Le commutateur d'arrêt est un commutateur ordinaire avec les lames de contact 33, 34, 35 (*fig.* 2) fixées sur une base isolante et un contact mobile 6 claveté sur la tige de manœuvre 1. La lame 33 est en communication constante avec le fil d'entrée d'un circuit dérivé du circuit principal et elle présente une surface suffisante pour rester toujours en contact avec la pièce mobile 6. Chacune des lames 34 et 35 est reliée à l'un des tampons de choc électriques 8 et 10, de telle sorte que le retour du circuit s'effectue à travers la clé magnétique 20, après avoir passé par les deux arrêts des tourelles, lorsque la manette est dans la position d'attente, c'est-à-dire au zéro, et que le commutateur 6 touche en même temps les contacts 34 et 35 ; le courant ne passe dans un seul arrêt que si la manette est en dehors du zéro, à droite ou à gauche, ainsi que le montre la figure.

Le commutateur inverseur, analogue au précédent, est immédiatement placé au-dessous de lui. Il comprend une tige mobile 11 clavetée sur la tige centrale 1 et pouvant toucher les lames de contact 12, 13, 14, 15, 16. Les deux lames 12 sont en connexion constante avec les fils d'entrée du circuit générateur, les deux autres 14 et 15 sont reliées au balai de l'électromoteur M, l'une à travers le commutateur et le rhéostat. Les deux dernières lames 13 et 16 constituent des contacts sans connexion correspondant à la position zéro de la manette. On remarque que, dans toutes ses positions, la pièce mobile 11 est toujours en contact avec les lames 14 et 15 et, suivant qu'elle se meut à droite ou à gauche, elle les relie alternativement avec l'un ou l'autre des balais du moteur M.

Le commutateur d'arrêt et le commutateur inverseur sont les deux seuls appareils directement fixés à la tige 1, les autres sont manœuvrés par relation à travers les secteurs transmetteurs 17 et 18. Ce sont des secteurs de roues d'angle, dont l'un, 17, s'engrène avec le pied de la tige 1, tandis que le second, 18, est fixé à l'enveloppe de l'électro-aimant 19. Cet électro-aimant est fou sur son axe horizontal, sur lequel est aussi montée l'armature 20 ainsi que les deux secteurs dentés 21 et 22. Ces diverses parties constituent l'embrayage électromagnétique.

La bobine de l'électro-aimant est contenue dans un espace annulaire et son circuit, dernier tiers du circuit principal, est relié en parallèle avec les arrêts 8 et 10 quand la manette est au zéro. L'armature de l'électro porte une goupille 36 maintenue, avec un peu de jeu latéral, par les deux pièces 37 et 38, sur les secteurs dentés 21 et 22. Ces secteurs sont fous sur l'axe transversal qui les supporte et sont constamment engrenés avec le pignon conique 23, de telle sorte que, quand l'appareil fonctionne, un secteur seul transmet le mouvement ; l'autre secteur est mû par le pignon dans une direction opposée sans actionner aucun mécanisme et se trouve ramené dans sa position initiale quand la manette est au zéro. L'armature 20 porte, sur sa surface plate, une dent qui s'engage dans une rainure pratiquée sur le noyau de l'électro, de manière que les deux secteurs sont mus à la fois quand l'électro est excité ; dès qu'il ne l'est plus, un ressort pousse l'armature et dégage la dent.

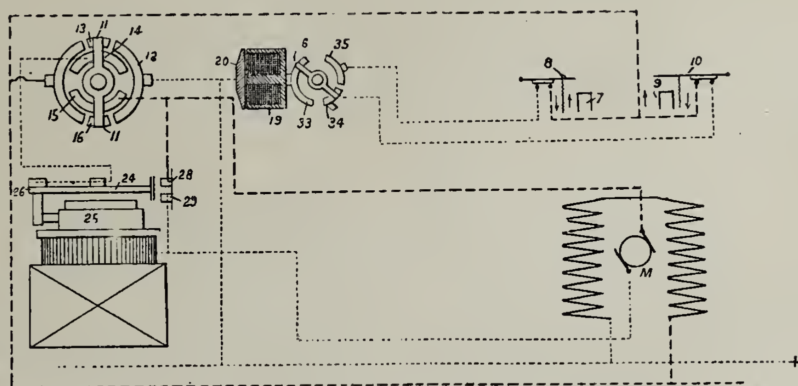



Fig. 2. — Schéma des connexions de la cartouche électrique.

Le pignon 23 entraîne le bras 24 avec le porte-balais 26, celui-ci étant en constante communication avec le commutateur collecteur 25. Ce bras porte aussi une pièce de contact 27 destinée à mettre en court-circuit les bobines de l'armature du moteur M quand la manette est ramenée au zéro. Cette opération s'effectue par l'intermédiaire de deux contacts frotteurs 28 et 29, reliés au moteur, et qui sont mis l'un et l'autre en communication par la pièce 27, la manette étant au zéro ; un ressort 30 ramène les balais à un contact neutre isolé des autres, point de repos du collecteur 25, quand le circuit de la clé d'arrêt magnétique est automatiquement rompu par la tourelle venant toucher l'un des butoirs 8 ou 10.

Le collecteur 25 est semblable à un collecteur de dynamo et chacune de ses pièces de contact est reliée à des bobines constituant les résistances 31 du rhéostat; ces bobines sont séparées les unes des autres par des disques 32 de matière isolante.

Maintenant que nous connaissons les organes de ce manipulateur, voyons-les fonctionner et cherchons rapidement à nous rendre compte de la position que prennent ces différentes pièces actionnées par le passage du courant.

Si la manette est au repos, les dynamos étant en marche, aucun courant ne passe, sauf à travers l'électro-aimant 19 qui met ainsi la tige centrale 1 en connexion avec le porte-balais 24. En déplaçant cette manette à droite ou à gauche, le commutateur d'arrêt envoie le courant dans l'un ou l'autre des butoirs 8 ou 10, suivant la direction de la manette. En même temps, la pièce mobile 11 du commutateur inverseur excite le moteur M dans le sens indiqué. Le déplacement

de la manette, qui a suffi à établir cette double connexion, correspond exactement à l'espace qui existe entre la goupille 36 de l'armature 20 et les pièces d'emmanchement 37 et 38 des deux secteurs 21 et 22 ; il en résulte que la pièce 27 viendra réunir les deux contacts 28 et 29 et que, par suite, les bobines de l'armature du moteur seront en court-circuit : tout mouvement est alors arrêté.

Si l'on continue à déplacer la manette, le porte-balais 24 sera actionné par les secteurs 21 et 22 et le pignon 23 ; les balais viendront donc successivement toucher les différents contacts du collecteur 25 ; le court-circuit cesse et un courant, très faible d'abord, à cause des résistances intercalées, est envoyé dans le moteur ; ce courant augmente proportionnellement au déplacement de la manette jusqu'à ce qu'enfin, toutes les résistances étant enlevées, le moteur donne sa vitesse maximum ; à chaque position de la manette correspond donc une vitesse déterminée. Ramenons la manette au zéro, le ressort 30 agit sur le porte-balais, qui revient à son point de repos en repassant successivement par toutes ses précédentes positions ; la vitesse du moteur est alors graduellement diminuée jusqu'à l'arrêt complet, car, au zéro, la pièce 27 revient réunir les contacts 28 et 29 et établit alors le court-circuit. Si l'on continue au delà du zéro le mouvement imprimé à la manette, le commutateur d'arrêt et le commutateur inverseur établissent les connexions inverses ; le second secteur 21 ou 22, suivant le cas, entraîne le pignon et le porte-balais, d'où il s'ensuit que le moteur M prend une marche inverse à son précédent mouvement. Lorsque l'on déplace rapidement la manette à droite et à gauche du zéro, le moteur tourne à droite, puis à gauche, pendant autant de temps que l'on veut. Ajoutons qu'à l'extrême limite du déplacement, l'un des arrêts 8 ou 10 étant en connexion, le circuit est coupé automatiquement et tout le système s'arrête. Pour remettre en marche, le pointeur doit d'abord ramener la manette au zéro.

### COMPAS AVERTISSEUR ET ENREGISTREUR DE ROUTE, SYSTÈ E HEIT

Lorsque sur un bâtiment la route est donnée, il est indispensable pour l'officier de quart, pour le commandant, d'être renseignés à chaque instant sur la rigoureuse observance des ordres ; les embardées, les déviations involontaires que les hommes de barre laissent souvent s'effectuer, en un moment de fatigue survenu naturellement en dépit d'une attention soutenue, doivent être notées et relevées avec soin, de manière à ce que l'on puisse se rendre compte exactement de toutes ces sinuosités, les rectifier et garder une direction immuable, dont la connaissance mathématique est l'une des bases principales de la navigation. C'est pour toutes ces raisons que le compas avertisseur des déviations subies a été un problème dont la solution a tenté bien des chercheurs. Tous, sans exception, pensaient pouvoir utiliser le heurt de l'aiguille contre des contacts fixes pour fermer un circuit électrique sur une sonnerie ou un enregistreur. Mais la rose est un mobile trop délicat pour qu'on puisse même l'effleurer sans troubler ses indications. A bord des navires de guerre surtout, toutes les masses métalliques environnantes, fixes ou mobiles, viennent non seulement modifier et retarder à chaque instant le moment magnétique du compas de route, mais encore l'affaiblir jusqu'à l'inertie ; on ne pouvait donc songer, dans ce cas particulier, à y ajouter encore une influence supplémentaire, étant donné surtout que, pour d'autres raisons également indispensables, le poids de la rose avait été réduit à un minimum vraiment incroyable, soit 12 gr.

En présence de ces difficultés qui semblaient insurmontables, on a laissé le compas libre de tout mouvement pour relever seulement les déviations de la barre du gouvernail qui étaient en réalité la cause première de celles de la rose. Là, plus de crainte d'influencer le moment magnétique du système mobile ; aussi, maintenant, les indicateurs d'angles de barre sont-ils nombreux à bord des navires de guerre ; français et étrangers en possèdent d'également ingénieux.

Mais la difficulté première était ainsi tournée et non vaincue ; elle vient de l'être par M. Charles Heit, capitaine au long cours, commandant *le Félix-Touache*, de la Compagnie de

Navigation mixte, au moyen de son compas avertisseur et enregistreur, qui figurait dans la classe 33 de l'Exposition universelle, au Palais de la Navigation.

Si nous énumérons tout d'abord les fonctions préconisées par M. Heit, nous voyons que son compas :

1° Indique à l'homme de barre la route donnée par le capitaine;

2° Enregistre cette route ainsi que tous les changements qui peuvent par la suite y être apportés accidentellement ou volontairement, sans qu'il soit possible d'éviter l'enregistrement de ces changements;

3° Avertit par sonneries le capitaine des déviations du navire, des embardées, des changements de route.

Pour obtenir ces résultats, pour que le système magnétique ne puisse être influencé par le courant, de très faible intensité, il est vrai, qui circule à proximité, la rose a tout d'abord été modifiée d'une façon complète, tout en conservant, dans sa construction intime, les principes si avantageux et si nécessaires de la rose Thomson.

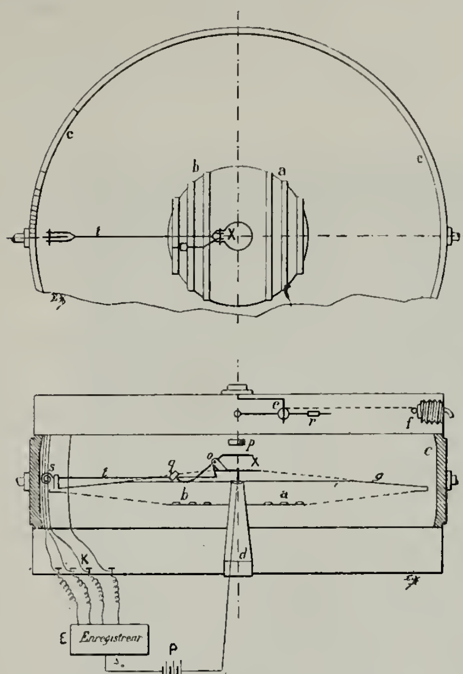


Fig. 3. — Compas avertisseur Heit.

Les aiguilles aimantées *a* (*fig.* 3) sont au nombre de six; elles sont de différentes grandeurs, croissantes vers le centre et accouplées deux à deux, l'une au-dessus de l'autre, afin d'avoir une intensité magnétique maximum. Mais les aiguilles sont disposées d'un seul côté du centre; de l'autre, des aiguilles de laiton *b* équilibrent le système. Ces tiges de laiton se trouvent disposées symétriquement aux aiguilles aimantées, qui, par leur position, échappent ainsi à toute influence perturbatrice du courant enregistreur, comme nous le verrons plus loin. La rose Heit porte en son centre un pivot d'acier dont la pointe tournée vers le bas repose sur une agate. Cette agate est sertie dans une petite cavité ménagée au centre du support *d* de la cuvette et remplie de mercure, afin de donner passage au courant électrique qui arrive par le pivot. Sur la rose (*fig.* 3), perpendiculairement aux aiguilles aimantées, se trouve fixée une tige de paille *t* garnie à ses extrémités d'armatures de cuivre reliées par un fil métallique et terminée en *s* par une spirale de palladium. Cette flèche est solidaire, par l'intermédiaire d'un bras articulé *o*, d'un petit plateau *x*, dont la position est maintenue horizontale, en temps ordinaire, par le contrepoids *q*; la flèche ne peut donc qu'effectuer des mouvements de va-et-vient dans le plan horizontal *st* et venir toucher les bords internes de la cuvette ou s'en écarter. Il n'y a donc plus de frottements ni, par suite, d'altérations dans la sensibilité de la rose. Au-dessus du plateau *x*, un poids P est suspendu par une cordelette et peut, par l'intermédiaire d'un système de poulie *e*, venir appuyer sur le plateau *x* sous l'influence d'une soufflerie *f*.

Quant à la cuvette, elle consiste en un anneau rigide de 5 cm de hauteur, d'une épaisseur convenable, faite en une matière mauvaise conductrice de l'électricité. Sur sa surface interne, elle porte 27 touches métalliques *c* ou contacts isolés les uns des autres et présentant la même hauteur, 5 cm, que la cuvette elle-même. Ces contacts sont de largeurs différentes :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 15 | correspondent | à des | déviations | de | 1 degré |
| 4 | — | — | — | | 2 |
| 2 | — | — | — | | 5 |
| 2 | — | — | — | | 1 quart 1/2 |
| 2 | — | — | — | | 5 quarts |
| 2 | — | — | — | | 6 quarts |

Chacun de ces contacts est relié à l'une des bornes d'un enregistreur E et à une sonnerie correspondante; une pile P est intercalée dans le circuit. Les conducteurs passent dans la base de l'habitacle et aboutissent respectivement à des balais qui viennent frotter sur des bagues enfilées sur un pivot supportant la cuvette.

Cette cuvette peut donc tourner au moyen d'un pignon et d'une couronne dentée; elle est pourvue, en outre, d'une double suspension à la cardan qui repose sur des galets roulant sur un rail. Afin d'arrêter les vibrations trop fortes que les mouvements de la machine motrice du navire pourraient lui communiquer, la suspension à la cardan est elle-même suspendue par des fils métalliques fixés par l'une des extrémités aux couteaux de la suspension et par l'autre à deux boules reposant sur des ressorts en boudin attachés sur une équerre de cuivre. L'équilibre du système est alors parfait.

Enfin, pour provoquer à des intervalles réguliers et suffisamment rapprochés le mouvement en avant de la flèche *st* qui fermera le circuit entre l'enregistreur, les sonneries et l'un des contacts de la cuvette, un petit électro-aimant non représenté sur la figure reçoit un courant automatiquement distribué par un mouvement d'horlogerie, toutes les trente secondes par exemple; l'électro-aimant attire son armature, qui agit sur le soufflet *f*, le poids *p* tombe sur le plateau *x*, la tige *ts* va s'appuyer sur la touche *c*, ferme le circuit et l'enregistreur inscrit le degré qui est exactement, à ce moment, perpendiculaire à la direction NS des aiguilles aimantées de la rose.

Cela posé, voyons la mise en fonctionnement du compas enregistreur. Pour donner la route, le capitaine fait tourner la cuvette à l'aide d'une clé commandant le pignon denté jusqu'à ce que la touche zéro, qui se trouve au milieu des 15 premières touches de contact, soit dans le prolongement, c'est-à-dire en face de la flèche en paille *s*. Ce mouvement de giration, entraînant le pivot de la cuvette, fait tourner les bagues du collecteur d'un même angle et n'occasionne aucun trouble dans les conducteurs, qui sont toujours fixes et qui ont une position constante par rapport aux aimants de la rose. A partir de ce moment, tous les mouvements, toutes les déviations, tous les changements de route du navire, seront inscrits sur la feuille de l'enregistreur, sans erreur possible, à des intervalles de temps constants. Bien entendu le mouvement de va-et-vient de la flèche *s* peut être réglé à volonté, toutes les dix, vingt ou trente secondes, comme on le désire. Il importe aussi de remarquer que cette flèche, par sa position invariablement perpendiculaire au système magnétique de la rose, indique le point *ouest;* l'enregistrement de la route suivie s'effectuera donc par rapport à ce point fixe de l'horizon, ce qui est indifférent, car il suffit, pour avoir la vraie route, de prendre la mesure de l'angle compris entre la ligne *est-ouest* et la ligne de foi, c'est-à-dire l'axe du navire.

Afin d'éviter une supercherie de l'homme de barre, c'est-à-dire la rectification des erreurs commises en cours de route, la cuvette ne peut tourner que dans un sens. C'est pourquoi, lorsque le capitaine aura donné une nouvelle route, la mesure de cette seconde direction sera égale à la somme des deux arcs successivement décrits par la cuvette. Si ce total est supérieur à 360°, il faudra naturellement les soustraire au lieu de les additionner.

On voit, par tout ce qui précède, que le compas Heit est merveilleusement combiné dans ses détails et que rien ne peut plus troubler les indications du système magnétique. Il inscrit exactement la route donnée et en garde la trace sur les feuilles de l'enregistreur. Celui-ci, inscrivant également tous les changements et les fluctuations de direction, permet ainsi au capitaine de vérifier les capacités de l'homme de barre et la surveillance exercée par l'officier de quart. En temps de brume, le point d'estimation sera facilement rectifié soit par le calcul, en se basant sur la vitesse, soit graphiquement, en reportant sur la carte la réduction proportionnelle de la courbe de marche. Les manœuvres insolites sont également dénoncées par les sonneries et le capitaine pourra prendre alors immédiatement telle mesure qu'il jugera convenable. En cas d'abordage ou d'avaries, le témoignage écrit de tous les mouvements effectués et de l'heure à laquelle ils auront été faits deviendra précieux pour les tribunaux maritimes qui auront à juger le différend; on pourra éviter de la sorte bien des expertises douteuses et des procès onéreux.

### FERMETURE DES CLOISONS ÉTANCHES A BORD DES NAVIRES

La constante fermeture des portes a été très élégamment obtenue, grâce à une combinaison imaginée par un ingénieur de Glasgow, M. William Kirkaldy. Il fait tourner dans un cylindre de tôle fixe, muni de deux ouvertures opposées, un second cylindre percé d'une seule porte. C'est, en résumé, le tour classique. L'homme qui veut passer fait pivoter, à l'aide d'une poignée, le cylindre intérieur jusqu'à ce que la porte coïncide avec l'ouverture fixe ; il se place dans le tour et lui fait accomplir une nouvelle demi-révolution qui lui permet de sortir par l'ouverture fixe opposée. En résumé, le passage est toujours fermé.

Mais, bien que très pratique, le système de M. Kirkaldy ne peut s'admettre que dans des cas particuliers pour certains passages, à bord des paquebots surtout, car, sur les navires de guerre, dans les soutes, il faut que l'ouverture puisse être maintenue à un moment donné pour la circulation et le transport des munitions de combat, des charbons, des cordages, etc.

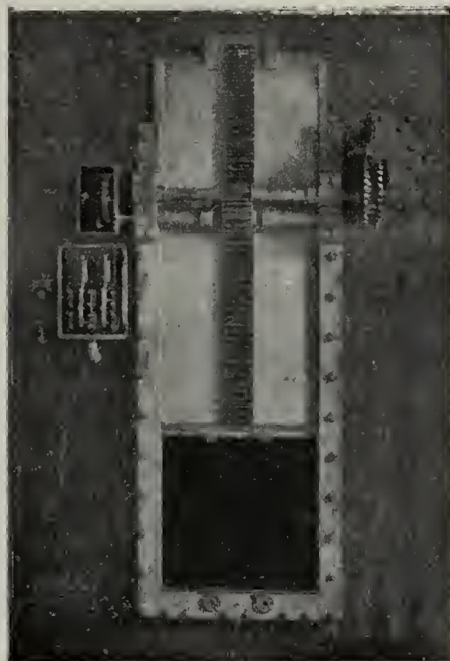


Fig. 4.
Fermeture électrique des cloisons étanches.

Il faut donc laisser la porte ouverte, mais sous la condition expresse qu'elle pourra rapidement se fermer et avertir en même temps automatiquement l'officier de la passerelle ou du blockhaus de sa fermeture. Ces fonctions ne peuvent évidemment s'obtenir que par transmission électrique; on l'a compris et, à diverses reprises, les inventeurs ont proposé divers dispositifs qui assuraient à distance la fermeture des compartiments étanches; mais jusqu'ici aucun n'avait été réellement mis en pratique. La marine des États-Unis a fait, en 1899, la première application d'un nouveau système de fermeture à distance inauguré par M. Bowles, ingénieur des constructions navales, à bord du croiseur protégé l'*Atlanta*, qui a été reconstruit et modifié en 1899 d'après les enseignements fournis par la guerre de Cuba. Les essais ayant été des plus satisfaisants, l'adoption est définitive.

Si nous résumons d'abord brièvement les opérations que l'on peut réaliser à l'aide du système Bowles (*fig.* 4), nous voyons que :

1° Toutes les portes peuvent être instantanément et simultanément fermées, soit du pont, soit d'un poste quelconque choisi à volonté ; un signal annonce alors la fermeture ;

2° On peut fermer et ouvrir chacune des portes indépendamment des autres ;

3° Ces opérations peuvent s'effectuer sur place de l'un ou de l'autre côté de la cloison sans pour cela empêcher ni troubler le service à distance ;

4° La fermeture s'obtient hermétique en dépit d'un afflux d'eau ou malgré un amas de charbon venant obstruer la porte.

La dimension de ces portes peut être quelconque ; pour les soutes à charbon, elles mesurent ordinairement 1,40 m de haut sur 0,60 m de large. La porte elle-même consiste en une plaque d'acier, rivée à un châssis de glissement, qui s'engage dans des coulisseaux de bronze boulonnés à la cloison ; ce châssis est muni de onze coins taillés en biseau, quatre de chaque côté, un en haut et deux en bas ; les coulisseaux étant taillés de même, ces coins s'y ajustent exactement de manière à former un joint absolument étanche et à coincer la plaque dans le dernier centimètre de la fermeture.

La base des coulisseaux est un peu plus ouverte, afin d'éviter un coinçage trop prononcé.

La porte d'acier porte sur sa partie médiane une crémaillère de bronze, dans laquelle engrène un pignon claveté sur un arbre horizontal qui est fixé en haut des glissières. Ce pignon entraîne un second pignon plus petit claveté sur un second arbre horizontal à chaque extrémité duquel se trouve fixée une roue striée qui, à son tour, engrène une vis sans fin; cet engrenage traverse normalement la cloison et est entraîné par un moteur électrique de 1 cheval, enfermé dans une boîte étanche du côté du compartiment voisin. Dans le cas où la manœuvre à bras serait nécessaire, une manivelle est disposée sur l'engrenage de chaque côté du cloisonnement. Le moteur électrique est à enroulement compound; les bobines du shunt sont relativement faibles et leur enroulement se trouve en dehors des bobines en série. Les circuits sont disposés de telle sorte que, pour ouvrir la porte, les bobines en série sont seules mises dans le circuit, ce qui suffit à donner un démarrage rapide et facile; mais, pour la fermeture, comme il peut être nécessaire de couper à travers du charbon accumulé, les bobines du shunt sont jointes alors aux autres et les couteaux de la plaque d'acier viennent bien vite séparer les obstructions et s'encastrer dans la base des glissières.

On peut fermer le circuit près des portes à l'aide d'un levier de commutateur à trois arrêts: à droite, pour ouvrir la porte; à gauche, pour la fermer. La position centrale est celle du repos; dans ce cas, le circuit de fermeture peut être commandé du pont ou de tout autre point choisi sur le bâtiment.

Si donc nous résumons le fonctionnement du système électrique Bowles, nous voyons qu'en cas de collision, au moment du danger, l'officier de la passerelle peut immédiatement fermer toutes les portes des compartiments; une petite lampe témoin s'allume pendant le temps de l'opération et s'éteint dès que la porte est complètement close. Si quelque marin de l'équipage se trouve enfermé dans l'un des compartiments ou qu'il lui soit absolument nécessaire de traverser d'un compartiment dans un autre, il lui suffit de mettre sur le cran de gauche le levier du commutateur local et la porte s'ouvrira. Dès qu'il sera passé, le levier revient automatiquement à sa position de repos et la porte se referme seule; en même temps un signal lumineux de cette double manœuvre est donné au poste de la passerelle.

Toutes les fonctions s'accomplissent avec une régularité et une sûreté remarquables. Il est impossible de ne pas être impressionné favorablement par la sécurité que procure dorénavant aux navires ce mode si ingénieux de fermeture; ce difficile et important problème est résolu d'une façon admirable. Le système Bowles figurait à l'Exposition universelle dans la section de la marine américaine.

## TRANSMETTEURS D'ORDRES SYSTÈME VIALET-CHABRAND

La question des transmetteurs d'ordres à bord des navires est de la plus haute importance; elle devient capitale lorsqu'il s'agit des bâtiments de combat. On conçoit facilement la nécessité absolue de communications constantes et rapides entre la passerelle, le blockhaus et la salle des machines, par exemple, de telle sorte que le commandant ou l'officier de quart puisse être toujours en rapport avec les mécaniciens en dépit de l'éloignement, du cloisonnement et de tous les obstacles qui les séparent. Les tubes acoustiques ne peuvent suffire et, avec les navires modernes, à grande vitesse et à structure compliquée, l'énergie électrique seule a pu réussir à servir d'intermédiaire fidèle et instantanée entre le chef responsable et les divers services du bord.

Si, sur les paquebots, dont la destinée ordinaire se contente de la simple navigation, le problème est parfaitement résolu, on peut craindre bien des difficultés de réalisation pratique pour les navires de guerre. En effet, comment se comporteront tous ces appareils électriques pendant le combat? Comment la plupart de ces lampes, de ces électros, de ces manipulateurs et indicateurs délicats pourront-ils résister aux vibrations répétées, aux chocs, aux ébranlements communiqués à toute la membrure du bâtiment par le tir incessant de ces énormes pièces

dont le tonnerre rend sourds les servants des tourelles, qui renversent les hommes par leur simple souffle et sous l'influence desquelles fléchissent, après plusieurs coups, les barrots des entreponts?

Malgré ces craintes, en dépit des discussions soulevées et de la répugnance qu'éprouvent la plupart des officiers à voir se multiplier à bord les appareils électriques, les transmetteurs d'ordres actionnés électriquement s'imposent pour ainsi dire, devrait-on, en cas d'avaries pendant l'action, en revenir aux moyens rudimentaires et recourir, comme dans la guerre sino-japonaise, aux simples voyants, munis de chiffres, que l'on place dans les endroits les plus apparents.

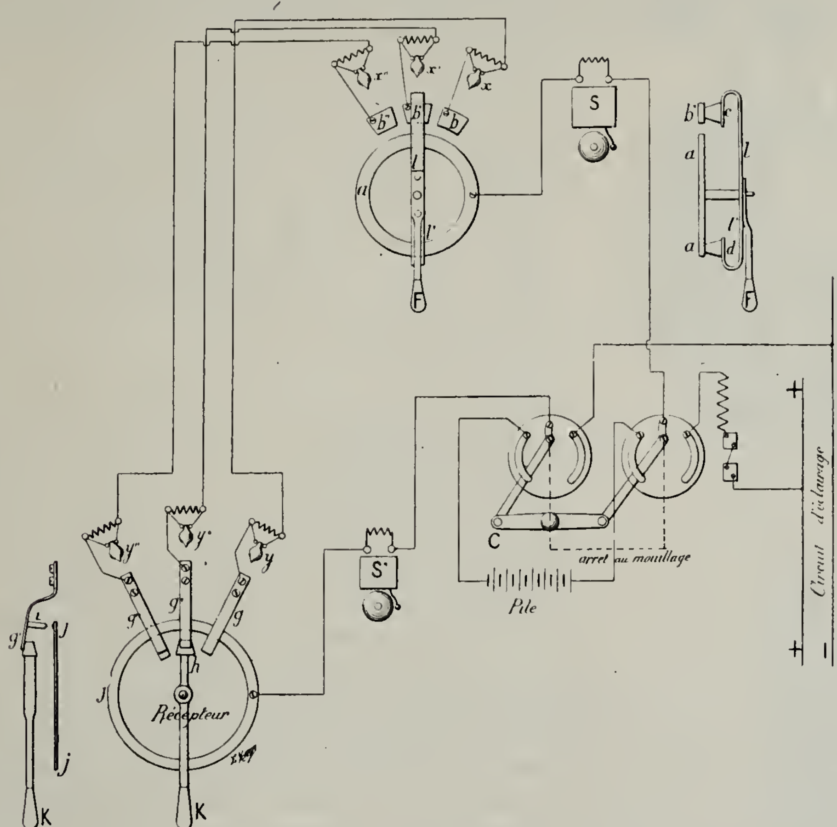



Fig. 5. — Connexions du transmetteur d'ordres Vialet-Chabrand.

En conséquence, puisque l'on doit admettre, en principe, les transmetteurs électriques, encore faut-il qu'ils soient simples et robustes, que leur manipulation s'opère facilement et que les avaries soient en général rapidement réparables. Il faut, en outre, que, dans leur fonctionnement, il n'y ait place pour aucune erreur et qu'une interruption brusque et inattendue du courant ne vienne pas provoquer de fausses manœuvres; l'absence d'ordres serait préférable à des ordres mal compris et mal exécutés.

La plupart des nombreux transmetteurs d'ordres électriques, adoptés par les différentes marines de guerre ou de commerce, peuvent être groupés en trois classes, suivant les principes sur lesquels repose leur fonctionnement. Dans les uns, une aiguille de contact glisse sur les divisions d'une résistance en produisant des changements proportionnels dans la différence de potentiel des indicateurs et provoque le déplacement d'index selon les ordres transmis. Ces appareils, dus à l'ingéniosité du savant lieutenant Fiske, ont été montés sur l'*Indiana* et sur une grande partie des bâtiments de la marine américaine.

D'autres sont basés sur les actions d'un champ magnétique tournant et MM. Siemens et

Halske en ont doté la marine allemande. Enfin, une troisième catégorie adoptée, en France, à bord de plusieurs navires de l'Etat et du commerce, se compose de transmetteurs formés de simples commutateurs à plusieurs directions avec des lampes témoins montées en série et des sonneries avertisseuses. Dans cette classe rentrent les appareils de M. Vialet-Chabrand, constructeur à la Ciotat, exposés dans la classe 33, au Palais de la Navigation. Ils comprennent trois ensembles principaux, à savoir : transmetteur d'ordres pour la machine ; contrôle du sens de marche ; transmetteur d'ordres pour la barre du gouvernail.

Si nous examinons d'abord la figure 5, nous verrons la disposition des connexions reliant un transmetteur à un récepteur ainsi que la disposition des leviers de manœuvre.

Ces leviers se composent, pour le transmetteur, d'une manette F, à l'aide de laquelle on peut faire passer l'une des extrémités de la lame flexible de contact $ll'$ sur les plots $b$, $b'$, $b''$, tandis

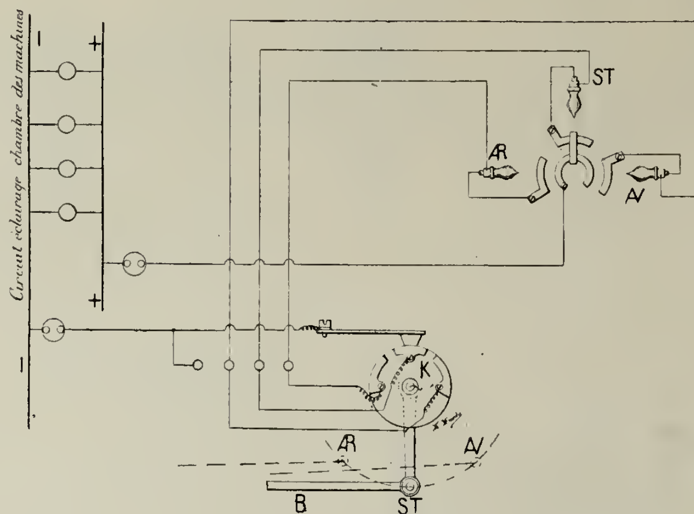



Fig. 6. — Connexions du récepteur du transmetteur d'ordres Vialet-Chabrand avec la machine.

que l'autre $d$ frotte sur le cercle métallique $a$. Dans le récepteur, la poignée K peut venir soulever les lames $g$, $g'$, $g''$ et faire cesser ainsi leur contact avec le cercle métallique $j$. A l'aide d'un commutateur C, on s'alimentera soit avec le circuit d'éclairage du bord, soit à l'aide d'une batterie de piles primaires (12 éléments Leclanché) ou d'accumulateurs. Le fonctionnement de cet ensemble s'explique de lui-même. Dès que le levier du transmetteur est placé sur un ordre, $b'$ par exemple, le circuit est fermé sur les lampes $x'$ et $y'$ qui s'allument et sur les sonneries S, S' qui tintent ; le mécanicien averti lit l'ordre inscrit près de la lampe allumée de son récepteur, place son levier sur la division correspondante et, ce faisant, interrompt le circuit. L'extinction des lampes, l'arrêt de la sonnerie indiquent que l'ordre est reçu et compris.

Pour être sûr qu'il est exécuté, M. Vialet-Chabrand rend le récepteur solidaire des organes de mise en train de la machine (*fig.* 6). Si nous supposons les trois commandements rudimentaires : *arrière*, *stop*, *avant*, nous voyons que l'allumage de la lampe correspondante au commandement reçu ne peut s'effectuer qu'après la mise en train de la machine. Pour cela, le distributeur K tourne, par l'intermédiaire de la bielle B, à droite ou à gauche, selon le mouvement de l'une des pièces qui manœuvrent la mise en train de la machine, et ferme le circuit sur la lampe correspondante du récepteur. Dans ce cas, on peut être sûr, au transmetteur, que l'ordre est non seulement compris, mais encore exécuté et que la machine tourne dans le sens voulu. Il s'ensuit également que le mécanicien de service au récepteur peut contrôler sur cet appareil que son personnel a immédiatement obéi à l'ordre reçu. Ce distributeur peut encore être remplacé par trois contacts qu'établirait successivement le coulisseau du servomoteur de la mise en train.

Nous avons d'abord simplement supposé trois commandements ; la figure 7 nous montre un ensemble d'appareils comportant tous les ordres nécessaires pour faire varier les tours unité par unité à partir de 20 tours. Dans ce cas, il y a deux cadrans et deux leviers. Le cadran supérieur comporte les indications générales : *stop*, *avant*, *arrière*, *augmente* ou *diminue tours*. Sur le cadran inférieur sont inscrites deux rangées de chiffres se complétant l'une par l'autre. Supposons que, la machine étant stoppée, on veuille commander : *avant*, 50 *tours ;* le levier supérieur sera placé sur l'indication *avant* et le levier inférieur sur le chiffre 50. Si l'on veut augmenter ou diminuer la vitesse de 5 tours, par exemple, il suffira de porter le levier supérieur sur l'une des indications : *augmente* ou *diminue tours*, et ensuite le levier inférieur sur le chiffre 5. Le mécanicien ne pourra se tromper et relèvera le chiffre de la rangée intérieure, puisque le commandement a été précédé d'un avertissement préliminaire. Dans tous les cas, les sonneries tintent et les lampes brillent jusqu'à ce que la manette du récepteur soit placée sur le commandement ou le chiffre correspondant; les interprétations ne peuvent être faussées.

Dans le cas de manœuvre avec le compteur Valessie, généralement adopté en France, M. Vialet-Chabrand a remplacé les indications : *augmente* ou *diminue tours*, par celles de : *gagne* ou *perd secondes*. Ce sont là de simples modifications d'inscription sur les cadrans.

Sur le support des appareils se trouvent disposés : 1° un commutateur permettant de s'alimenter soit sur le circuit d'éclairage, soit sur la batterie d'accumulateurs ou de piles; dans le premier cas, une lampe témoin permet de constater le fonctionnement des dynamos ou leur interruption ; 2° un bouton à l'aide duquel le commandant fait fonctionner les sonneries des deux postes pour transmettre des ordres complémentaires en cas d'urgence et après convention; un autre contact peut allumer deux lampes disposées radialement à 45° de part et d'autre de la verticale et qui servent à reconnaître, la nuit, la position du levier de manœuvre, c'est-à-dire le dernier ordre transmis.

Dans le but de pouvoir renseigner le commandant chaque fois qu'il le juge nécessaire sur la marche des machines, M. Vialet-Chabrand a construit, comme adjonction à ses transmetteurs d'ordres, un appareil de vérification qui comporte principalement deux indicateurs disposés sur la passerelle et dont les aiguilles peuvent, à un moment donné, dans une manœuvre par exemple, montrer le nombre de tours de la machine. Ces indicateurs ne fonctionnent donc que temporairement et sont alimentés par l'intermédiaire d'une petite dynamo auxiliaire et d'un commutateur à enclenchement électromagnétique. Cette dynamo est solidaire, par intermédiaire d'engrenages, de l'arbre même de la machine motrice ; elle tourne donc synchroniquement dans un sens ou dans l'autre et envoie dans les bobines des inducteurs un courant qui provoque un déplacement proportionnel des aiguilles; en même temps, l'une des deux lampes s'allume et, suivant sa couleur rouge ou

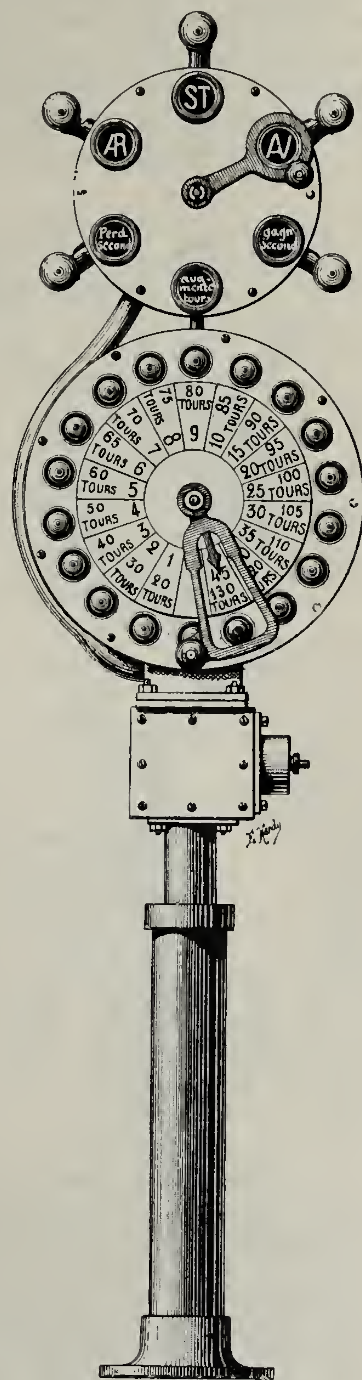



Fig. 7.
Transmetteur d'ordres Vialet-Chabrand.

bleue, elle accuse la marche en avant ou en arrière. Afin d'obtenir des indications toujours précises, quatre boîtes de correction, comprenant chacune huit petites résistances, permettent, par leur groupement, de faire varier l'une des deux aiguilles indicatrices d'un nombre quelconque de divisions. M. Vialet-Chabrand n'a pas exposé cet appareil de contrôle de la machine; seul le système d'avertissement de sens de marche analogue à celui précédemment décrit figurait à son exposition. Pour connaître dans ce cas le dernier nombre de tours, l'officier de la passerelle doit faire parcourir les divisions du cadran à la poignée du transmetteur jusqu'à ce que la sonnerie cesse et que l'éclairage disparaisse. C'est, en somme, la manœuvre inverse : le transmetteur et le récepteur changent de rôle.

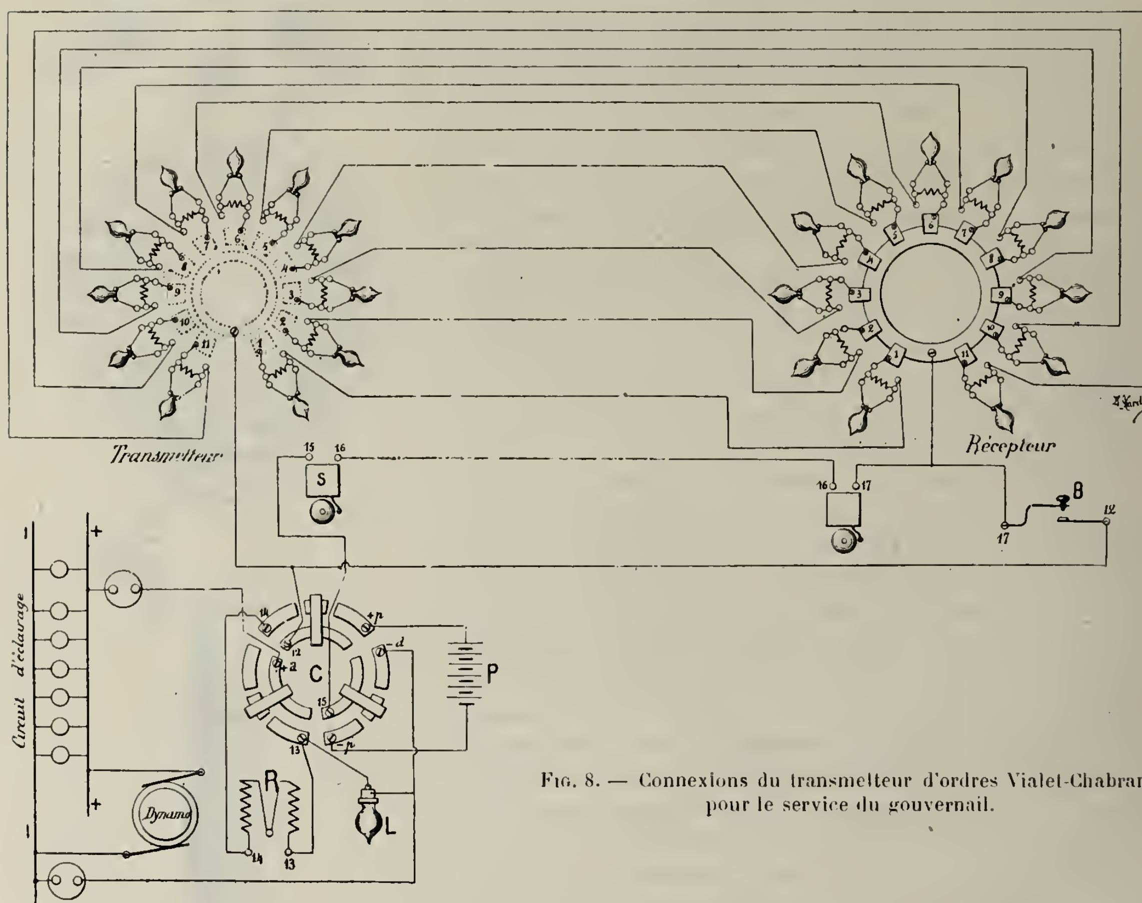



Fig. 8. — Connexions du transmetteur d'ordres Vialet-Chabrand pour le service du gouvernail.

La transmission à distance des ordres de barre est évidemment indispensable, même dans le cas où la commande de cette barre s'effectue électriquement; il faut en effet pouvoir, à un moment quelconque, en cas d'avarie à la commande, transmettre la route d'un point quelconque du bâtiment jusqu'aux hommes de barre. Comme on le voit par la figure 8, les détails de connexion sont les mêmes que pour les transmetteurs précédents. Un commutateur C, à trois directions, permet d'emprunter le courant nécessaire à la dynamo du bord, par l'intermédiaire d'une résistance R réglable, ou à une batterie de piles. Une lampe témoin L indique par son allumage que le courant de circuit d'éclairage parvient aux appareils de transmission. Le commutateur, la résistance et la lampe sont enfermés dans le socle du transmetteur, qui comporte un certain nombre de plots de contact avec des lampes en dérivation ; le récepteur est identique. Les sonneries S, S′ sont montées à l'extérieur du socle. Le modèle exposé par l'inventeur est celui qui est installé à bord du croiseur de guerre *Châteaurenault;* il comprend huit

ordres différents donnant les déviations prévues de 5 en 5 à droite ou à gauche d'un zéro disposé dans l'axe vertical. Deux indications supplémentaires inscrites sur les contacts inférieurs montrent que l'on peut relier le transmetteur avec l'appareil de la commande électrique de la barre ou avec celui du poste central. Bien entendu, deux circuits absolument indépendants relient ces transmetteurs aux deux récepteurs montés sur l'arrière, l'un contre l'autre, à proximité de la barre.

Si le filament d'une des lampes indicatrices vient à se briser, il est encore possible de continuer la transmission des ordres, car les sonneries S, S' se font toujours entendre aux deux postes tant que les leviers de manœuvre sont vis-à-vis de commandements différents et ne s'arrêtent que s'ils sont en regard du même ordre.

La figure 9 représente des postes analogues ; leur seule différence consiste en ce qu'ils peuvent transmettre les ordres à la barre, degré par degré. Pour cela, les inscriptions à droite et à gauche, ainsi que les dizaines, sont réparties sur deux tableaux différents, tandis que le troisième cadran ne comporte que les unités. Par la position combinée et successive des leviers de manœuvre, on peut donc transmettre un nombre quelconque de 0 à 39. Sur la figure, on a commandé 27° à droite.

Comme nous le disions plus haut, les transmetteurs Vialet-Chabrand sont montés à bord de plusieurs navires de guerre, comme *le Brennus*, cuirassé d'escadre, le croiseur *Châteaurenault* et sur la plupart des paquebots de la Compagnie des Messageries maritimes, tels que *l'Australien*, *le Polynésien*, *le Laos*, *l'Indus*, *le Tonkin*, etc. Les résultats obtenus ont été excellents.

Le fonctionnement de ces appareils est évidemment fort simple; la construction en est robuste, immense avantage pour un service à la mer; mais ils nécessitent un très grand nombre de conducteurs. Or il est toujours dangereux, à bord d'un bâtiment de combat, de les multiplier, de resserrer continuellement le réseau à mailles déjà si étroites des circuits et d'augmenter ainsi le travail et la responsabilité énorme qui incombent à la petite escouade d'élite chargée de la surveillance et de la réparation du matériel électrique. En outre, nous aimerions à voir les appareils de M. Vialet-Chabrand pourvus d'une aiguille de répétition venant parcourir, sur le transmetteur, le même chemin accompli sur le récepteur, au fur et à mesure de l'exécution de l'ordre transmis. Évidemment les sonneries tintent et les lampes restent allumées jusqu'à la concordance des ordres transmis ; mais si, par une coïncidence fâcheuse, rare, mais encore possible, le circuit des piles vient à se rompre, pour une cause quelconque, pendant la manœuvre du récepteur, les indications cessent au transmetteur et il sera bien difficile de s'apercevoir que cette interruption provient du courant et non de la concordance des leviers de manœuvre. Il semblerait alors préférable de ne faire tinter la sonnerie, au contraire, qu'au moment de cette concordance; l'avertissement paraîtrait plus sûr, et il serait facile de le faire cesser, après constatation, au transmetteur. Il faut croire cependant que cette objection n'est pas primordiale, puisque les appareils Vialet-Chabrand sont en service depuis longtemps déjà et qu'ils n'ont donné lieu à aucun mécompte grave.

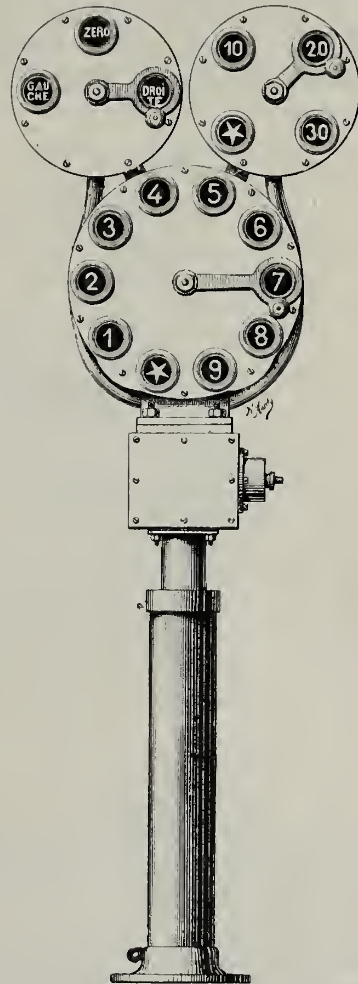


Fig. 9. — Poste du transmetteur d'ordres de barre Vialet-Chabrand.

## TRANSMETTEURS D'ORDRES DE MM. SIEMENS ET HALSKE

Considérons, d'une part, trois bobines identiques et enroulées dans le même sens sur des noyaux de fer doux pourvus eux-mêmes d'une culasse commune, les fils étant réunis par l'une de leurs extrémités en une même jonction, tandis que les autres extrémités, isolées l'une de l'autre, se rendent à un manipulateur éloigné. D'autre part, ce manipulateur, formé d'un cylindre d'ébonite, est muni de deux secteurs métalliques diamétralement opposés, sur lesquels frottent trois contacts calés à 120° l'un de l'autre et reliés respectivement aux trois bobines du récepteur, tandis qu'une source d'énergie électrique à courant continu communique à deux anneaux métalliques montés sur l'axe du cylindre et reliés avec lui. Il résulte de cette disposition que, le courant n'étant jamais interrompu dans le manipulateur, chaque bobine se trouvera à son tour

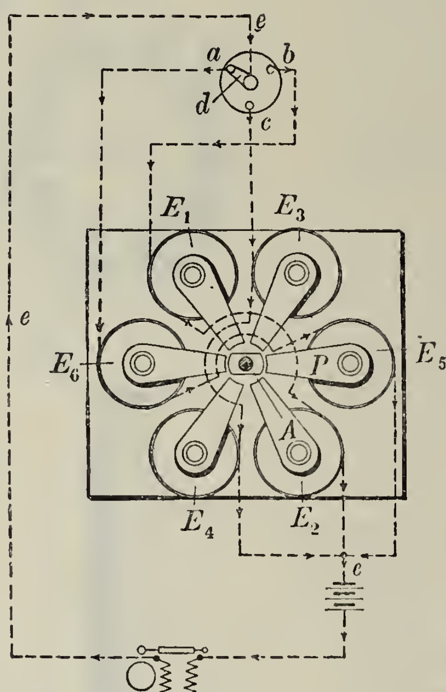



Fig. 10. — Connexions de l'organe principal du transmetteur d'ordres Siemens et Halske.

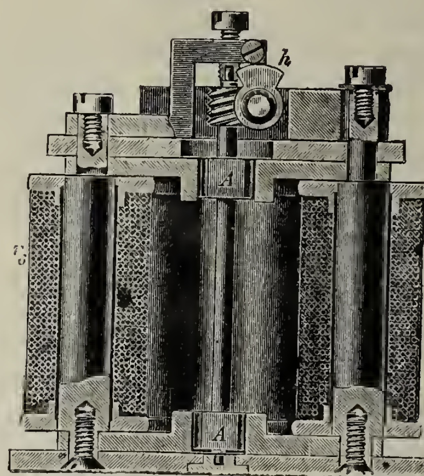



Fig. 11. — Organe principal du transmetteur d'ordres Siemens et Halske.

soit hors circuit, soit en tension avec les deux autres groupées en quantité ou en tension avec une seule, ou encore en quantité avec une seule, ou enfin deux sont en quantité avec la troisième en tension ; le sens du courant changera alors une fois pour chaque bobine par tour de manipulateur. Plaçons enfin les noyaux des bobines aux sommets d'un triangle équilatéral dont le centre est occupé par un axe autour duquel peut pivoter une courte aiguille aimantée ; lorsque le courant, partant d'un secteur du manipulateur, traverse l'une des bobines, puis se bifurque dans les deux autres en dérivations égales, les noyaux de fer doux s'aimantent ; il se forme dans celui de la première bobine un pôle positif, par exemple, et deux pôles négatifs égaux entre eux dans les autres ; l'intensité du champ, résultant de ces trois pôles, se dirige du centre du système vers le premier noyau, et l'aiguille mobile aimantée s'oriente dans cette même direction. Imprimons au cylindre du manipulateur un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, c'est-à-dire de gauche à droite, le champ résultant de cette modification dans la distribution du courant prendra une nouvelle direction et la position de l'aiguille aimantée subira une variation proportionnelle dans le même sens. En résumé, chaque déplace-

ment de 30°, par exemple, du cylindre provoque un déplacement égal de l'aiguille aimantée, soit dans un sens, soit dans l'autre, suivant le mouvement imprimé au cylindre.

Tel est le principe sur lequel repose la construction des transmetteurs d'ordres de MM. Siemens et Halske à champ magnétique tournant. Ce principe, décrit à diverses reprises, et selon ses diverses applications, dans les revues techniques françaises et étrangères, a été étudié spécialement dans la *Revue internationale d'électricité*, en 1892, par M. Yorel ; il ajoutait que M. Ramazotti, ingénieur de la marine, avait fait, à cette époque, construire chez MM. Sautter et Harlé des transmetteurs et des indicateurs analogues. Nous renverrons donc à cet article nos lecteurs pour plus amples renseignements [1].

Les appareils Siemens et Halske, qui figuraient à l'Exposition au premier étage du Palais d'Electricité, classe 27, groupe V, sont destinés à la transmission des ordres à bord des navires de guerre allemands ; ils consistent principalement en transmetteurs d'ordres pour la machine et la chambre de chauffe et en transmetteurs indicateurs des angles de barre.

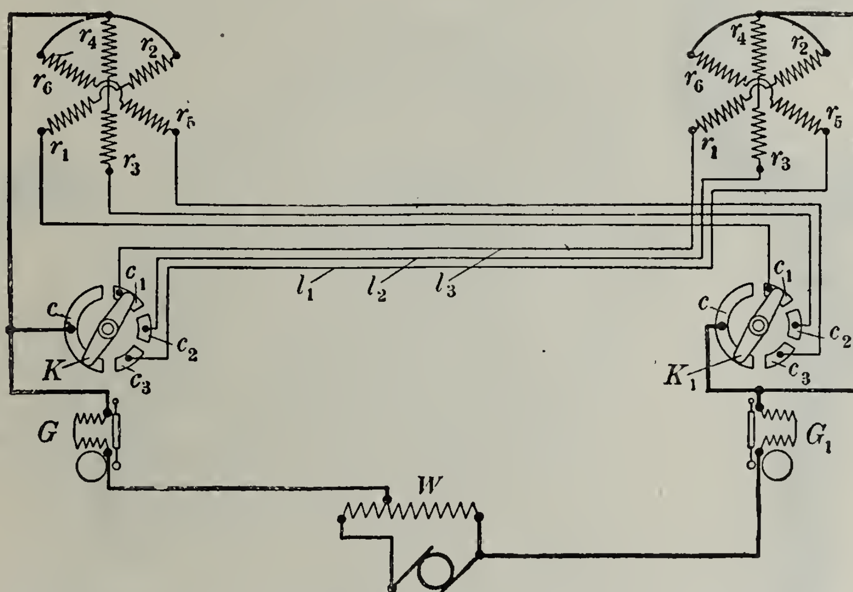



Fig. 12. — Schéma des connexions du transmetteur d'ordres Siemens et Halske.

La partie essentielle et commune à tous ces transmetteurs (*fig.* 10 et 11) comprend un ensemble de 6 bobines dont les noyaux en fer doux, disposés radialement, portent à leurs extrémités supérieures et inférieures des pôles P entre lesquels peut tourner une armature A ; l'entrefer est extrêmement petit. Les extrémités de l'enroulement de chacune de ces trois paires de bobines communiquent d'une part avec les trois points de contact *a*, *b*, *c* d'un commutateur ; d'autre part, elles se réunissent en une ligne commune de retour *e*, sur laquelle est montée une batterie de piles ; cette ligne de retour aboutit au centre du levier de manœuvre *d*. Lorsque celui-ci se trouve, par exemple, sur le contact *a* (*fig.* 10), le courant traverse le système dans la direction indiquée par les flèches et l'armature A se place dans la position $E_5$, $E_6$ ...

Si maintenant nous déplaçons le levier de manœuvre *d* dans le sens des aiguilles d'une montre, les noyaux en fer doux des bobines s'aimantent et la direction du champ se modifie dans le même sens ; il en résulte que l'armature A se déplace d'une même quantité. Bien entendu le mouvement de l'armature s'effectue en sens inverse si le commutateur *d* est lui-même inversé.

La disposition du circuit magnétique est fort bien comprise, comme on peut le voir sur la figure 11. L'énergie avec laquelle l'armature A se déplace est très considérable et proportion-

1. *Revue internationale d'Electricité*, 1892, 2e semestre, p. 435.

nelle à l'intensité du courant qui traverse l'appareil, d'autant plus que cette action, d'ailleurs, est momentanée.

Les mouvements de l'armature A sont transmis à l'aiguille indicatrice du cadran par l'intermédiaire d'une vis sans fin et d'un pignon *h* (*fig.* 11).

Cette disposition présente deux avantages principaux et très importants, car :

1° On peut transmettre un nombre quelconque de commandements sans que, pour cela, le nombre des conducteurs en soit augmenté;

2° Il ne se produit aucune oscillation de l'aiguille indicatrice du cadran, puisque, à l'aide de la transmission par vis et pignon, cette aiguille est immédiatement arrêtée dès que cesse le mouvement du commutateur, même si le fonctionnement des appareils s'effectue très rapidement.

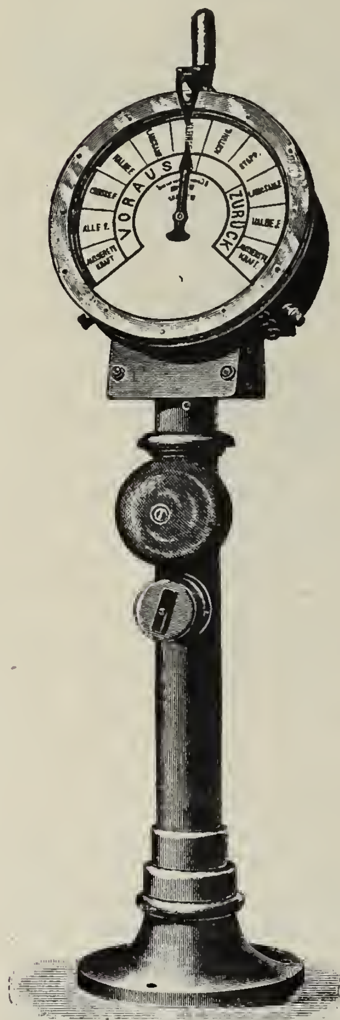



Fig. 13. — Transmetteur d'ordres Siemens et Halske.

Dans le système Siemens et Halske, la transmission des ordres s'effectue avec un signal d'avertissement et un signal de réponse. Les signaux d'avertissement sont donnés par l'intermédiaire d'une sonnerie qui est intercalée sur le conducteur de retour (*fig.* 10) et qui tinte dès que l'appareil fonctionne; il n'y a donc, de ce chef, aucune multiplication des conducteurs; en outre, l'avertissement de la sonnerie subsiste pendant tout le temps des signaux et dénonce par son silence un défaut quelconque dans la ligne. Les appareils comprenant toujours un commutateur et un ensemble de bobines avec armature et aiguille indicatrice, il s'ensuit que la position de cette aiguille montre la manœuvre faite au récepteur, dès que l'ordre a été transmis. S'il est compris, l'aiguille indicatrice, qui joue le rôle de répétiteur, doit venir, sur le cadran du transmetteur, coïncider avec la pointe du levier de manœuvre.

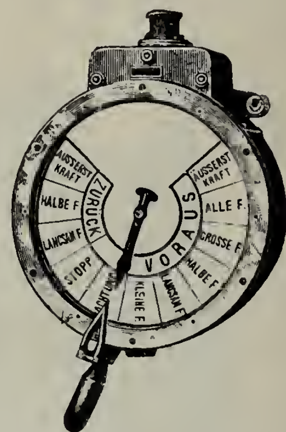



Fig. 14. — Récepteur d'ordres Siemens et Halske.

Le schéma (*fig.* 12) représente la disposition des connexions pour deux appareils de commandement avec les indicateurs de réponse. L'on voit que les extrémités des enroulements des trois paires de bobines $r_1$, $r_3$, $r_5$ communiquent, d'une part, avec les conducteurs $l_1$, $l_2$, $l_3$, pour aboutir respectivement aux pièces de contact $c_1$, $c_2$, $c_3$ des commutateurs K et $K_1$, tandis que, d'autre part, elles sont reliées aux bobines $r_6$, $r_4$, $r_2$, pour former le conducteur de retour commun sur lequel sont branchées les sonneries G et $G_1$ ainsi que la source d'énergie W qui communique en même temps avec le segment métallique *e* des commutateurs. Lorsqu'on déplace le levier du commutateur K au moyen d'une manette ou d'une manivelle, la source d'énergie est mise successivement en communication avec l'un des conducteurs et provoque le déplacement identique de l'armature des bobines et de l'aiguille indicatrice. On comprend par cette figure schématique que le nombre des conducteurs est toujours limité à sept, quelles que soient la variété et la multiplicité des commandements avec répétiteur et signal avertisseur.

Les transmetteurs et récepteurs d'ordres pour machines, que représentent dans leur en-

semble les figures 13 et 14, ne diffèrent entre eux que par le mode de support. Le transmetteur est monté sur pied ; le récepteur s'accroche ordinairement au mur ; les cadrans sont divisés en deux parties principales : *en avant*, *en arrière*, et comprennent divers commandements, tels que : *attention*, *stop*, *lentement*, *demi-vitesse*, *grande vitesse*, *à toute vitesse*. Dès que le levier du transmetteur est déplacé vers un ordre quelconque, l'aiguille indicatrice du récepteur se déplace du même angle vers l'ordre correspondant. Immédiatement l'homme du récepteur doit faire mouvoir son levier et le mettre en concordance avec l'aiguille indicatrice, ce qui provoque, sur le cadran du transmetteur, la déviation de l'aiguille venant se placer à son tour sur l'ordre transmis ; c'est la preuve que l'ordre a été reçu et compris. Pendant tout le temps de ces manœuvres, les sonneries tintent.

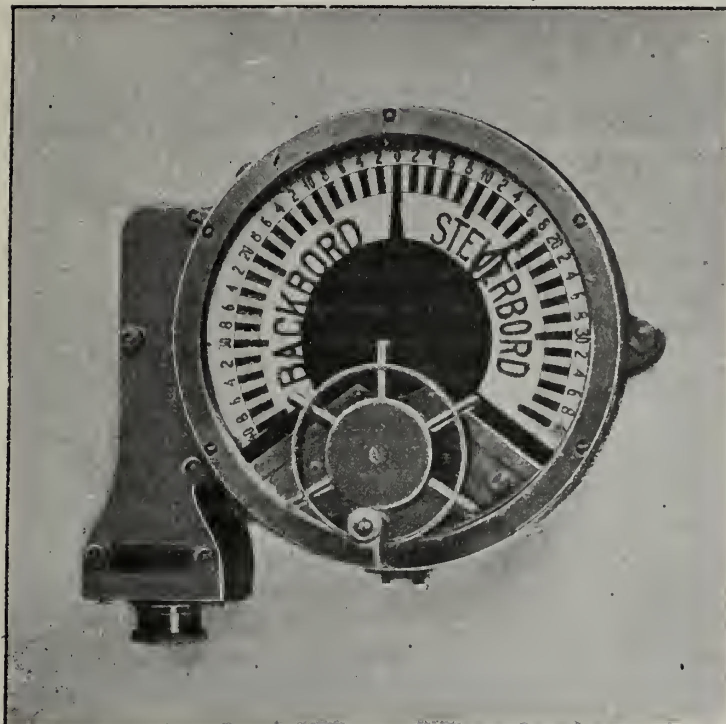



Fig. 15. — Transmetteur d'ordres de barre Siemens et Halske.

La rapidité avec laquelle se meut l'armature, en accord avec le déplacement du champ magnétique, est forcément limitée par le moment d'inertie des organes, car il est nécessaire que ces appareils soient extrêmement robustes. Mais cette rapidité est encore supérieure à celle qui est exigée pour la transmission des ordres sur les navires. Le système ne demande qu'à être protégé contre les chocs brusques et les à-coups dus à une fausse manipulation, comme cela peut souvent se produire ; c'est pourquoi MM. Siemens et Halske ont pourvu ces transmetteurs d'un piston amortisseur à air accouplé au levier de manipulation, ce qui n'empêche d'aucune façon l'exactitude des indications ni la correction du fonctionnement ; mais ce piston oppose aux chocs une telle résistance que les appareils ne courent plus aucun danger.

Au début d'une transmission, alors que le courant ne passe pas encore, l'aiguille du récepteur n'est pas en concordance lorsqu'on ferme le circuit ; c'est pour cela que l'axe du mouvement porte (*fig.* 11) un segment *h* qui, dans les positions extrêmes de l'aiguille, vient s'appuyer contre une cheville extérieure montée sur l'axe de l'armature A. Pour la mise en fonctionnement des appareils, il suffit alors de pousser le levier de manœuvre dans les deux positions extrêmes et, dans ce cas, il coïncide instantanément avec le levier du récepteur.

Dans le commutateur des appareils de transmission pour la salle des machines, il faut toujours obtenir une interruption franche du courant, surtout si l'on emprunte l'énergie nécessaire aux circuits d'éclairage. Pour cela, l'axe du levier est pourvu d'une roue étoilée dans les dents de laquelle s'engrènent des molettes fortement comprimées par un ressort robuste. Lorsque le levier se déplace alors sur les bagues de contact, l'interruption s'effectue toujours, rapide et brusque.

Les sonneries employées sont également d'un modèle spécial, complètement protégées contre toute invasion de poussières de charbon ou de vapeur d'eau.



Fig. 16. — Transmetteur de l'indicateur des angles de barre, système Siemens et Halske.

Les transmetteurs d'ordres de route pour les hommes de la barre sont absolument identiques aux précédents comme organes électriques; la seule différence qu'ils présentent (*fig.* 15) consiste forcément dans les indications inscrites sur le cadran; il est divisé en deux parties : *bâbord* à gauche, *tribord* à droite, avec des divisions identiques, correspondant aux degrés de déviation de 0 à 40. Le levier de manœuvre affecte la forme d'une roue à manettes semblable à celle du servomoteur commandant le gouvernail. Les appareils comportent également deux aiguilles; l'une d'elles suit les mouvements du commutateur; l'autre, réceptrice, enregistre les déplacements de l'armature des bobines.

Enfin, des indicateurs des angles de barre peuvent montrer à chaque instant automatiquement la route suivie, dans des récepteurs disposés sur la passerelle, dans le blockhaus, etc. Le transmetteur (*fig.* 16), seul, diffère quelque peu des appareils précédents; il comporte un commutateur accouplé directement au moyen d'une chaîne double avec le gouvernail; les différentes positions de la tige de contact de ce commutateur correspondent donc avec les déviations de la barre et sont transmises comme précédemment à un récepteur indicateur renfermant le groupe ordinaire des 6 bobines avec leur armature mobile solidaire d'une aiguille qui parcourt les divisions d'un cadran. Afin d'éviter tout dérangement du commutateur, ce qui pourrait arriver par suite de chocs brusques, la chaîne est munie de pièces intermédiaires faisant ressort; de plus, le commutateur est muni lui-même d'un échappement qui ne permet qu'une vitesse de déplacement déterminée, mais toujours prévue plus grande que la pratique ne l'exige; le déplacement total du gouvernail de bâbord à tribord s'effectue au maximum en 20 secondes. Les trois bagues de contact du commutateur, qui affectent la forme d'un pignon denté, sont déplacées l'une par rapport à l'autre de 1/3 de la distance qui sépare deux dents, afin que ces trois pignons, qui touchent alternativement les deux balais frotteurs, viennent communiquer successivement avec les trois conducteurs du circuit des bobines et transmettent ainsi tous les mouvements du gouvernail dans les deux sens.

Pour terminer, nous montrerons, sur la figure 17, l'installation d'un nombre illimité d'appareils Siemens et Halske. L'un des conducteurs se relie, à travers les sonneries $g$, $g'$, $g''$, à tous les manipulateurs $d$, $d'$, $d''$, tandis que l'autre, traversant les enroulements $r_1$, $r_2$, $r_3$, $r''_1$, $r''_2$, $r''_3$ des bobines, revient aboutir aux contacts $a$, $b$, $c$, $a''$, $b''$, $c''$ des commutateurs. Si l'un quelconque des manipulateurs $d$, $d'$, $d''$ est déplacé, un courant traverse tout l'ensemble des circuits et les appareils fonctionnent synchroniquement. On peut donc desservir un nombre quelconque de postes à l'aide de 8 conducteurs seulement, y compris les sonneries.

Comme dispositif général et commun à tous les appareils, deux lampes à incandescence éclairent intérieurement les cadrans, dont les indications ressortent en noir sur un fond lumineux. Une étanchéité complète est assurée; néanmoins le démontage s'opère facilement et sans

qu'il soit nécessaire de détacher aucune connexion ; toutes les pièces sont interchangeables et peuvent être remplacées avec la plus grande rapidité.

Les transmetteurs Siemens et Halske sont adoptés sur un grand nombre des cuirassés de la marine allemande et de la marine autrichienne, ainsi que sur les paquebots de la Compagnie du Norddeutscher Lloyd.

Il est évident que, dans un combat, ces transmetteurs peuvent avoir le sort malheureux et très aventuré de tous les appareils électriques, qui, à bord, sont exposés à tant d'avaries ; toute-

Fig. 17. — Installation d'un nombre illimité de transmetteurs d'ordres Siemens et Halske.

fois leur fonctionnement très ingénieux offre des sécurités et des moyens de vérification qui sont remarquables et doivent être remarqués.

## LE BATEAU ÉLECTRIQUE DE MM. SMIT ET ZOON

En attendant que la navigation électrique aborde la haute mer et que les conceptions américaines de torpilleurs actionnés électriquement se réalisent, les fleuves, les rivières et les canaux se peuplent davantage de jour en jour d'élégantes embarcations plus ou moins grandes qui, luxueuses, légères et rapides, sillonnent maintenant les cours d'eau des deux mondes. Un seul exemplaire de cette heureuse application de l'énergie électrique figurait à l'Exposition universelle ; il nous venait tout naturellement de la Hollande, de ce pays où la vie se passe en bateau, pour ainsi dire, et où la plupart des villes, Venises du Nord, sont coupées de canaux au lieu de rues et baignées de toutes parts par les eaux de la mer. L'*Electronaus* sort des chantiers de MM. Smit et Zoon, à Kinderdijk, et était exposé au rez-de-chaussée de la salle des machines au Champ-de-Mars, dans la section hollandaise ; il a pour frères jumeaux de nombreux types déjà en service un peu partout, tels que le *Triphasé*, la *Koningin Wilhelmina*, la *Nelly*, le *Kroonprins*, yacht de course du sultan de Bornéo, le *Politie*, bateau utilisé par la police de Rotterdam, etc...

Le bateau électrique de MM. Smit et Zoon (*fig.* 18) a 12 m de long et comporte une hélice fixe ordinaire terminant l'arbre de couche sur lequel vient se monter l'induit du moteur qui le met en mouvement.

Ce moteur, du type à quatre pôles, comprend un inducteur en acier coulé dont les enroulements sont divisés en quatre sections, afin de permettre le réglage de la vitesse ; le fil de cuivre des

bobines est à section rectangulaire de 3 sur 33 mm. Les pôles sont disposés de manière que le champ magnétique extérieur soit très faible. L'induit, qui présente un diamètre de 340 mm, est composé de tôles minces en acier doux assemblées sur un noyau à quatre projections fixé sur l'arbre; ces tôles portent 33 entailles où sont logées les douze spires d'un fil de cuivre rectangulaire présentant une section de 2 sur 7,5 mm. Le collecteur, qui comporte 99 lames, est isolé au mica et les connexions sont soigneusement soudées. Le graissage est obtenu automatiquement sur chaque palier au moyen d'un graisseur à bague ; la rotation de l'arbre s'effectue douce et sans à-coups par l'intermédiaire de deux ensembles de 19 billes d'acier durci de 10 mm de diamètre. La batterie d'accumulateurs, logée de chaque côté de la cabine dans les sièges, comprend 80 éléments Tudor B. O. VI. divisés en deux groupes et présente une capacité de 360 ampères-heure. Quant au coupleur, dont nous donnons les connexions détaillées (*fig.* 19),



Fig. 18. — Bateau électrique Smit et Zoon.

il est analogue à ceux que l'on emploie pour la traction et comporte un manipulateur qui peut prendre six positions et un interrupteur inverseur, afin de pouvoir grouper les accumulateurs en parallèle ou en série. En plaçant successivement le manipulateur à ses divers crans d'arrêt, on peut :

1° Grouper les bobines avec deux résistances en série ;

2° Grouper les bobines avec une résistance en série ;

3° Supprimer les deux résistances et grouper les bobines en série ;

4° Grouper deux bobines en parallèle et deux en série ;

5° Grouper trois bobines en parallèle ;

6° Grouper les quatre sections en parallèle.

On obtient alors ainsi diverses vitesses et diverses consommations de courant qui sont pour les positions 3, 4, 5 et 6 :

| TOURS DE L'HÉLICE A LA MINUTE | AMPÈRES | VOLTS | HEURES |
|---|---|---|---|
| 365 | 72 | 157 | 4 |
| 430 | 110 | 155 | 2,3 |
| 490 | 175 | 153 | 1,3 |
| 492 | 180 | 159 | 1 |

Le régime maximum imprime au bateau une vitesse de 10 nœuds, mais la vitesse normale est de 8 nœuds. Quant au rayon d'action, on voit qu'il est assez limité, puisque l'on ne peut guère compter, avec une vitesse moyenne, que sur trois ou quatre heures de route. Il est vrai que, dans la navigation fluviale, on rencontre maintenant de nombreuses usines d'électricité, points de ravitaillement qui ne font que se multiplier et où l'on pourra aisément renouveler sa charge. MM. Smit et Zoon ont combiné leurs connexions et leurs groupes d'accumulateurs de manière à pouvoir charger soit avec 220 volts de tension aux bornes, soit avec 110 volts. Dans le premier cas, le commutateur inverseur est placé dans la position supérieure et relie les bornes $a$ et $b$ (*fig.* 19) avec les conducteurs aboutissant à la source d'énergie ; on intercale dans ce dernier circuit une résistance réglable pour un courant maximum de 90 ampères. Pour la charge avec un courant à 110 volts, la batterie étant séparée en deux parties égales groupées en parallèle, on réunit directement, le commutateur $x$ étant hors circuit, les bornes $a$ et $b$ et les bornes $+$ et $-$ avec la source d'énergie, en ayant soin d'intercaler dans chaque groupe une résistance réglable

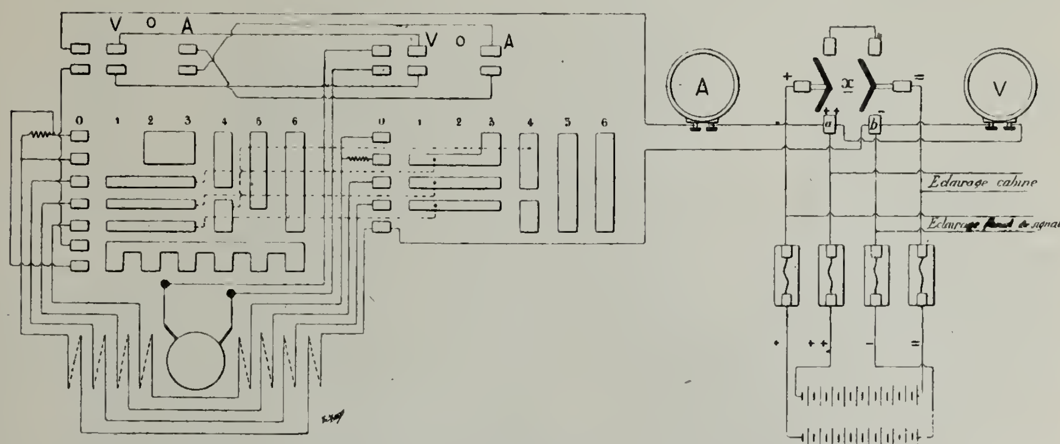



Fig. 19. — Connexions du coupleur du bateau électrique Smit et Zoon.

pour 90 ampères. Le coupleur et les appareils de réglage sont situés à l'avant de la cabine vitrée qui surmonte le bateau ; toutes les connexions, tous les circuits du moteur à la batterie et aux coupleurs sont soigneusement isolés au caoutchouc vulcanisé et sont enfermés sous plomb.

Nous n'avons pas besoin de faire ressortir les avantages d'une embarcation électrique sur sa congénère à vapeur : propreté, sécurité, rapidité d'un départ immédiat pour lequel l'énergie électrique est toujours prête ; inutilité d'un personnel toujours encombrant de chauffeurs et de mécaniciens. Les Compagnies de navigation fluviale comprennent depuis quelque temps déjà toutes ces supériorités, car elles commencent à créer des services publics de bateaux électriques qui ne feront évidemment que prendre de plus en plus d'extension. C'est à des constructeurs comme Smit et Zoon que nous serons redevables de semblables progrès.

### PROJECTEURS

Les projecteurs sont surtout employés dans la marine de guerre sur les navires et sur les côtes ; ils sont cependant aussi en usage courant sur certaines lignes de paquebots.

Ces appareils sont munis de lampes à arc de types spéciaux montées au foyer d'un miroir qui est étudié pour donner un faisceau parallèle.

Il y a plusieurs types de projecteurs au point de vue optique ; les uns sont à miroir sphérique système Mangin, les autres à miroir parabolique. Dans certains de ces appareils, les lampes sont à crayons inclinés, dans d'autres à crayons horizontaux.

Certains constructeurs exposaient des projecteurs de plus faible puissance, destinés à des applications variées, en particulier pour les scènes de théâtre et les navires de plaisance.

**Projecteurs de la Maison Sautter-Harlé et C^ie^.** — La maison Sautter-Harlé et C^ie^, qui s'est fait depuis longtemps une spécialité de ces appareils, construit plus de cent vingt modèles différents ; elle présentait à l'Exposition les types les plus employés par la marine marchande, la marine de guerre et le génie militaire. A la classe 33 était exposé un projecteur de 0,50 m de diamètre, étudié spécialement pour faciliter le passage de nuit du canal de Suez. A la classe 118 figurait un projecteur de 0,60 m de diamètre du modèle réglementaire de la marine française, qui peut être commandé soit à la main, soit à distance par l'électricité, et s'installe dans les hunes des navires. A la classe 117 figurait un projecteur monté sur chariot et sur affût du type réglementaire pour l'artillerie de campagne. A l'affût est accroché un fourgon contenant une bobine pour l'enroulement du câble qui relie le projecteur au générateur d'électricité. Dans cette même classe était exposé un projecteur de 1,50 m de diamètre du type adopté pour la défense des côtes. Cet appareil s'installe soit à poste fixe, soit en casemate ; il est alors monté sur socle à galets et peut circuler sur une voie ferrée.

Parmi ces nombreux appareils, nous allons décrire le projecteur de hune (*fig.* 20), qui, avec les projecteurs de pont, d'étrave, d'arrière et de sabord, est le plus employé sur les navires de guerre.

Le projecteur de hune est généralement commandé à distance. L'appareil complet se compose de trois parties distinctes : 1° le projecteur proprement dit, avec son mécanisme intérieur produisant les deux mouvements d'inclinaison et les deux mouvements d'orientation ; 2° le poste de commande à distance ; 3° le cable à six conducteurs reliant le poste de commande au projecteur.

Le mécanisme contenu dans le socle permet quatre mouvements différents du faisceau lumineux : de droite à gauche, de gauche à droite, de haut en bas et de bas en haut. A cet effet, le socle contient un moteur électrique M (*fig.* 21) à double induit indépendant, dont l'un commande les mouvements d'orientation et l'autre les mouvements d'inclinaison du projecteur.

Sur l'arbre de l'un des induits est calé un pignon denté P′, qui entraîne une roue dentée R′ ; par l'intermédiaire de la vis hélicoïdale V′ et des roues dentées B, C et C′, les mouvements de l'induit sont transmis au plateau S qui supporte le projecteur. Le levier extérieur E sert à débrayer le projecteur quand on veut faire la manœuvre à la main.

Par l'intermédiaire des roues dentées P et R, de la vis tangente V, de l'arbre fileté T sur lequel monte ou descend la douille-écrou J, le second induit du moteur transmet au projecteur ses deux mouvements d'inclinaison en manœuvrant les leviers L, L′ et L″ articulés en *l*, *l*′ et *l*″. La manœuvre à la main s'effectue en dévissant les chevilles *l*‴. Pour limiter les mouvements d'inclinaison, la douille J porte un doigt F qui rencontre, dans son mouvement sur la tige T, l'un ou l'autre des deux leviers G et G′ articulés sur un axe horizontal et les fait basculer autour de leur axe. Ces leviers, en basculant ainsi, coupent le circuit d'alimentation de la bobine du moteur et mettent l'induit en court-circuit, provoquant ainsi l'arrêt brusque du projecteur. La distance d'écartement des leviers G, G′ peut être réglée de façon à limiter l'inclinaison au degré voulu.

Le poste de commande à distance est logé dans une caisse cylindrique ; il comporte le commutateur d'arrêt et de mise en marche, les deux commutateurs d'orientation et d'inclinaison et les rhéostats pour faire varier la vitesse des moteurs.

Chaque commutateur se compose de deux cercles en cuivre superposés et divisés chacun en plusieurs segments. Un cylindre creux C, contenant un fort ressort en spirale, peut tourner sur son axe à l'intérieur des cercles ; il porte des pièces de cuivre A, B, dont il est isolé, qui sont elles-mêmes isolées l'une de l'autre et qui permettent de relier électriquement deux segments superposés, tels que *ea* et *df*. Le ressort en spirale sert à ramener le cylindre C dans sa position de repos quand on abandonne la poignée de manœuvre.

Les connexions entre les bornes du manipulateur et les différents segments sont faites comme l'indique le schéma (*fig.* 23).

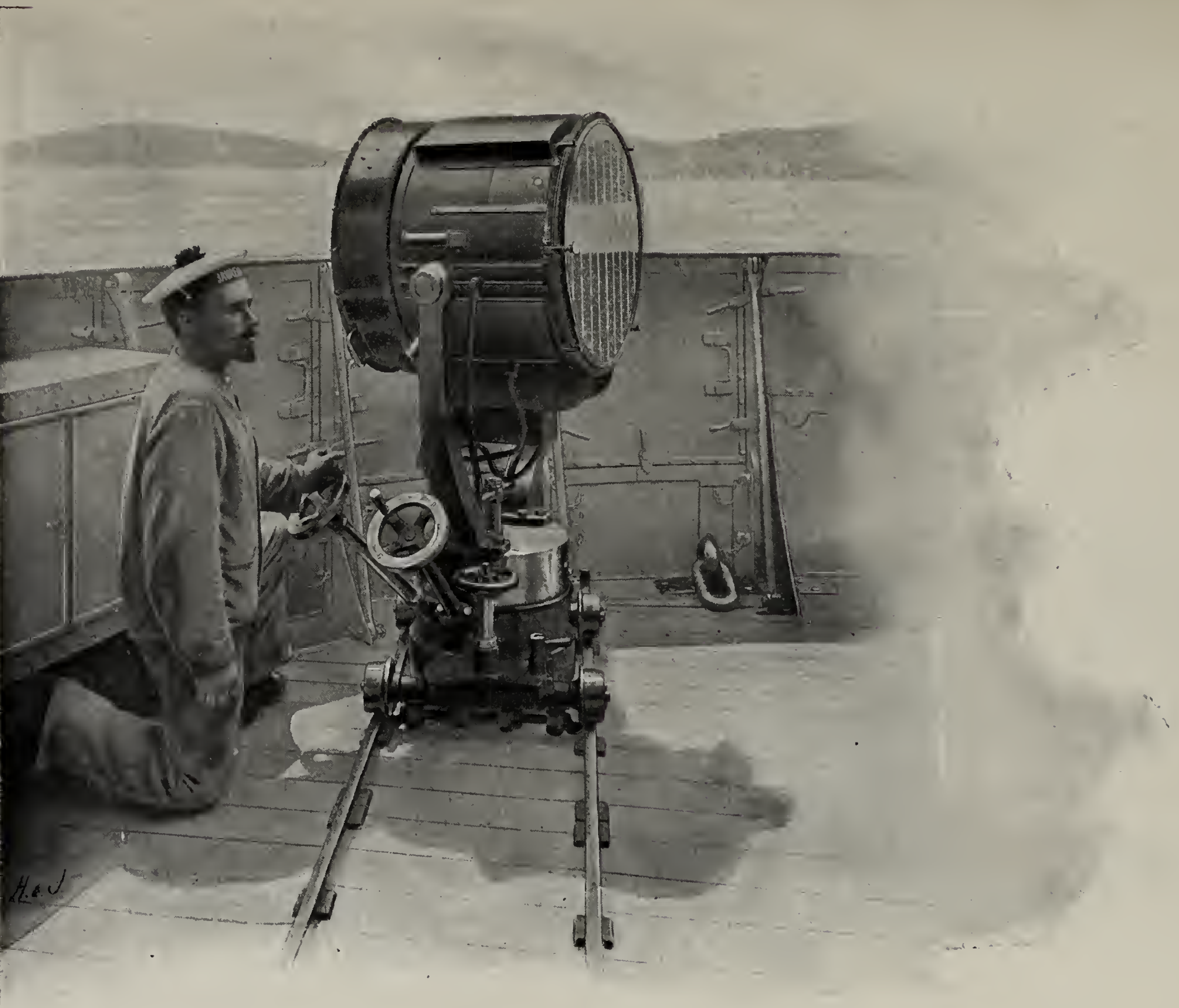


Fig. 20. — Projecteur Mangin de la maison Sautter-Harlé et Cie.

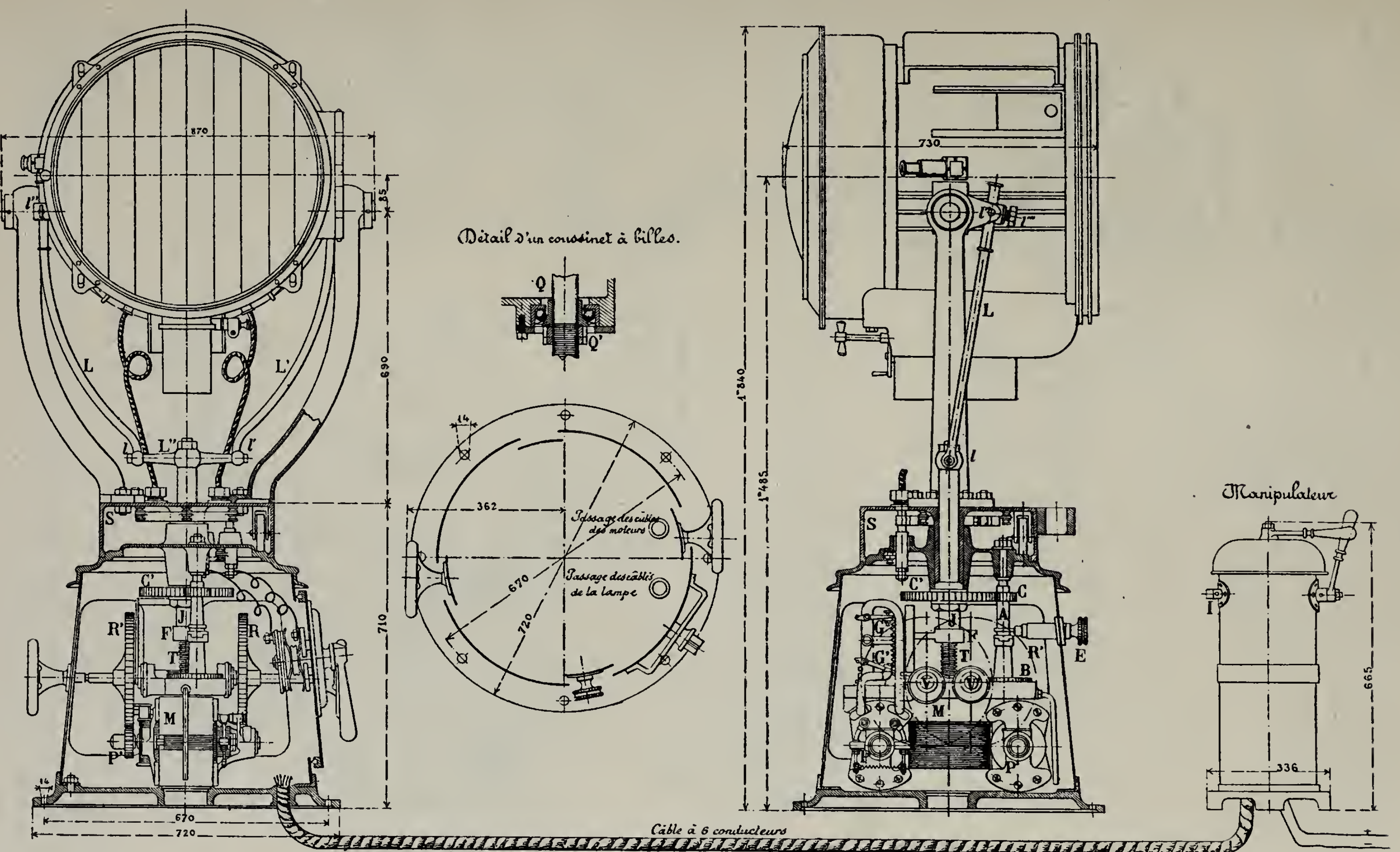



Fig. 21. — Projecteur Mangin avec commande électrique à distance.

Le manipulateur et le projecteur sont reliés par un câble à six conducteurs dont les extrémités sont repérées et qui se fixent dans les bornes des deux appareils. Ce câble est destiné uniquement à la commande à distance ; le câble pour la lampe est séparé.

Pour pouvoir allumer à distance la lampe du projecteur, on a installé un relais sur le fil négatif de la lampe à l'aide duquel on ouvre ou on ferme le circuit en manœuvrant l'interrupteur I

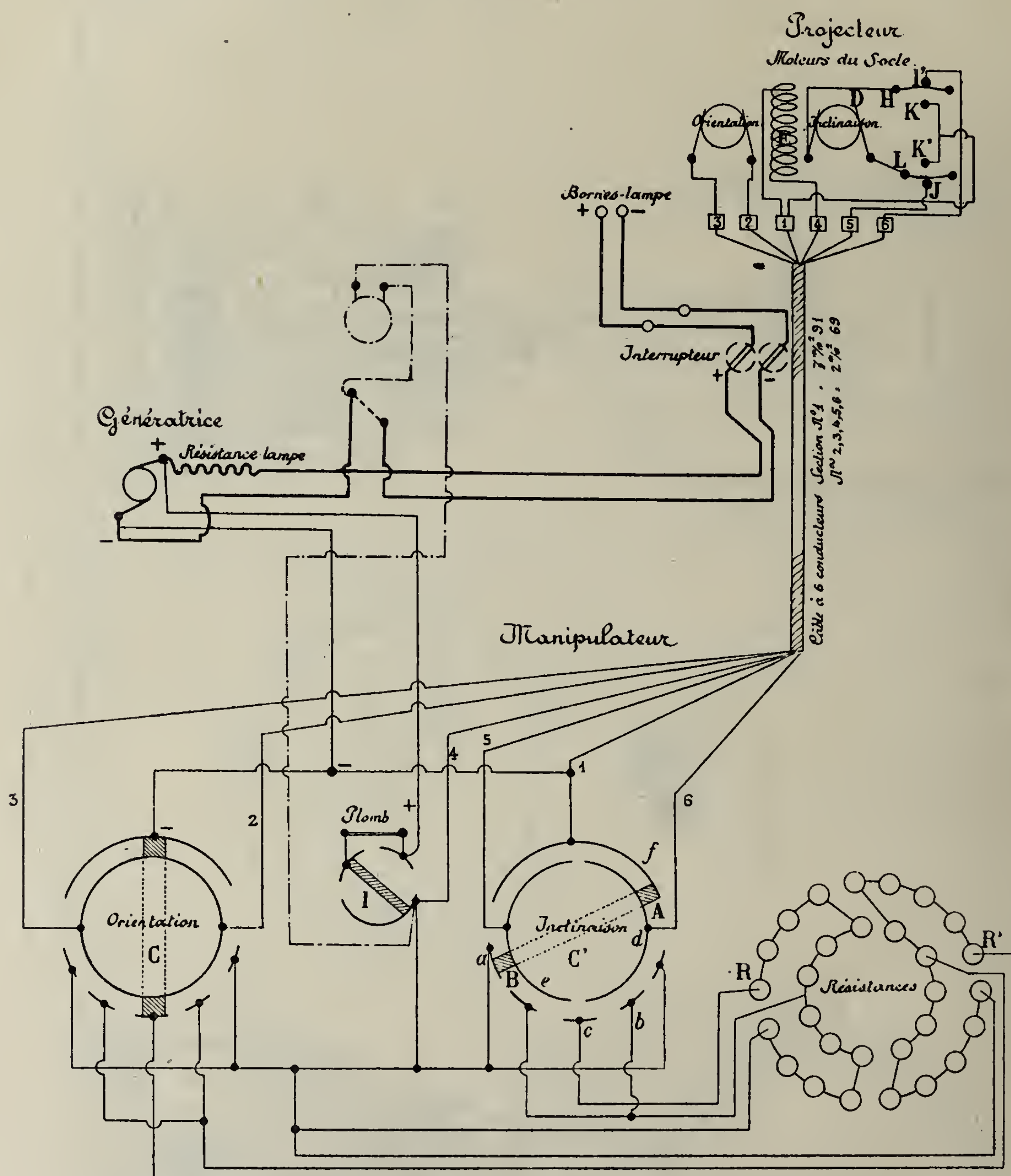



Fig. 22. — Schéma des connexions du projecteur Mangin avec son appareil de commande.

du poste de commande. Ce relais est branché, d'une part, sur l'interrupteur I et, d'autre part, sur le fil négatif de la lampe.

Les projecteurs à courte distance focale et à grand angle d'éclairement sont munis de lampes à charbons horizontaux ; quand la distance focale dépasse 60 pour 100 du diamètre, on emploie une lampe à charbons inclinés.

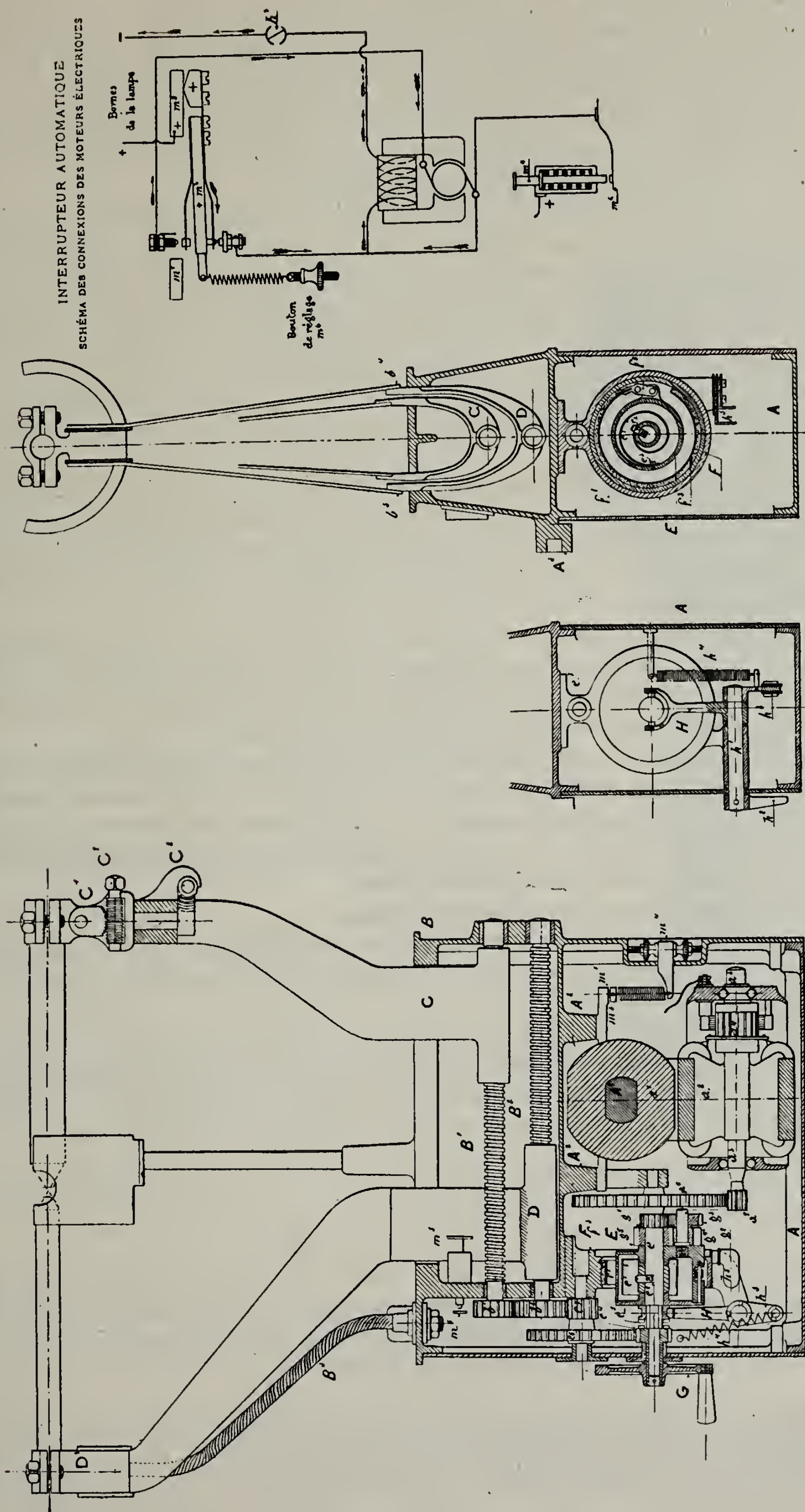



Fig. 23. — Détails de construction de la lampe du projecteur Mangin.

La lampe à charbons horizontaux se compose d'un petit moteur électrique placé en dérivation aux bornes du régulateur; il opère le rapprochement des charbons par action directe lorsque la différence de potentiel vient à dépasser une limite fixe. Ce moteur est également utilisé pour tendre un ressort qui sert à provoquer le mouvement d'écart des charbons à l'allumage. Ce ressort, qui est un simple accumulateur d'énergie, est constamment détendu lorsque le moteur ne fonctionne pas ; quand la lampe est en marche, au contraire, sa réaction est toujours disponible à un moment quelconque de la course des charbons.

La figure 23 représente trois coupes, verticale, longitudinale et transversale de cette lampe.

Le levier $h^2$ étant sur la marche automatique (A) et les charbons écartés, si nous fermons le circuit de la lampe, l'induit $a^2$ du moteur 4 se met en mouvement et, par l'intermédiaire de l'arbre $a^3$, du pignon et de la roue $a^5$ et $a^6$, de l'axe $e$, de l'embrayage $e^5$, du pignon $e^4$, de la roue $e$, du pignon $e^7$ et des roues $b^1$ et $b^2$, il entraîne les vis $B^1$ et $B^2$ en sens inverse, de façon à rapprocher les porte-charbons C et D. Pendant ce mouvement, la rotation de l'axe $e$ tend le ressort $e^1$ qui est entraîné par son extrémité $e^2$ ; le pignon $g^1$ fait tourner les roues $g^2$ et $g^4$, de façon qu'après un nombre déterminé de tours la dent de la roue $g^4$ vienne buter contre la partie saillante de la croix de Malte $g^5$.

L'arbre $e$ entraîne alors la boîte E non plus par l'effort du ressort $e^1$, mais par l'intermédiaire des pièces que nous venons de mentionner et de l'arbre $g^3$. L'effort est transmis par la boîte E du ressort $f^1$, par la bielle $f^2$, ainsi que son frotteur $f^3$, qui glisse dans la couronne F. Le ressort $e^1$ se trouve ainsi bandé toujours à la même tension. Ce mouvement se continue jusqu'à ce que les charbons viennent en contact.

A ce moment, la différence de potentiel aux bornes de la lampe devient nulle, l'armature $m^3$ de l'interrupteur automatique supprime le courant de l'induit, dont le couple moteur s'annule. Le ressort $e^1$ agit alors par l'énergie qu'il a emmagasinée et fait tourner l'axe $e$ en sens inverse.

Ce mouvement écarte les porte-charbons et provoque l'allumage.

Dès que l'arc est formé, la différence de potentiel aux bornes de l'électromoteur augmente et l'interrupteur automatique rétablit le courant dans l'induit. Le moteur se met en marche et rapproche les charbons en bandant le ressort $e^1$ ; le voltage baissant de nouveau, l'interrupteur automatique supprime le courant et le ressort $e^1$ écarte les charbons. Ces petits mouvements se succèdent ainsi et donnent à l'arc une fixité très grande.

La lampe peut fonctionner à une intensité quelconque.

Lorsque les crayons sont presque usés, le porte-charbon C bute sur le piston $m^5$ qui établit le contact avec $m^6$, mettant ainsi l'induit du moteur en court-circuit et, par suite, arrêtant le fonctionnement de la lampe.

Pour manœuvrer la lampe à la main, on tourne le levier $h^2$ sur la lettre M ; l'axe $h^1$ et la fourche H débrayent le manchon $e^5$, tandis que l'interrupteur $h^3$ coupe le courant du moteur. Les mouvements de rapprochement et d'écartement des charbons se font alors en manœuvrant le volant G calé sur le pignon $e^4$ qui transmet son mouvement par l'intermédiaire des roues et pignons $e^6$, $e^7$, $b^1$ et $b^2$.

La lampe à charbons inclinés a des propriétés identiques à la lampe à crayons horizontaux que nous venons de décrire.

**Projecteurs de la Maison Breguet.** — Ces projecteurs (*fig.* 24) sont construits de quatre types principaux, qui diffèrent entre eux par la dimension du miroir, qui a, suivant les cas, 30, 40, 60 ou 90 cm de diamètre. La lampe employée dans ces quatre types est la même, mais elle peut être réglée à des intensités de 15, 45, 75 ou 100 ampères, suivant le rhéostat introduit dans le circuit.

Le dispositif mécanique de manœuvre du projecteur ainsi que sa forme extérieure sont appropriés aux applications spéciales que l'on a en vue ; mais les organes essentiels restent identiques dans tous les cas. Dans certains cas, ces projecteurs sont manœuvrés à distance par un servomoteur électrique.

Le miroir en forme de paraboloïde de révolution est en cristal de 10 mm d'épaisseur environ entièrement travaillé sur les deux faces par des procédés mécaniques. Il est argenté sur sa face postérieure et fixé dans une gaine métallique mobile au fond d'un cylindre en tôle d'acier qui est fermé, à sa partie antérieure, par une porte à glaces planes. Devant cette porte, on peut accrocher à volonté une porte à lentilles divergentes; dans certains modèles, ces portes amovibles sont remplacées par d'autres pourvues d'appareils à signaux que l'on fixe devant d'autres portes à systèmes optiques variés de façon à pouvoir, à volonté, soit étaler, soit concentrer, soit cacher le faisceau.

Le cylindre portant l'appareil optique est convenablement aéré pour éviter un trop grand échauffement quand la lampe, qui est placée dans la partie inférieure, est en fonctionnement. Ce cylindre est muni de deux tourillons par l'intermédiaire desquels il repose sur des bras fixés à un plateau circulaire mobile. L'un des tourillons porte une roue directrice en contact avec une vis tangente qu'un volant permet de faire tourner pour donner au projecteur l'inclinaison que l'on désire.

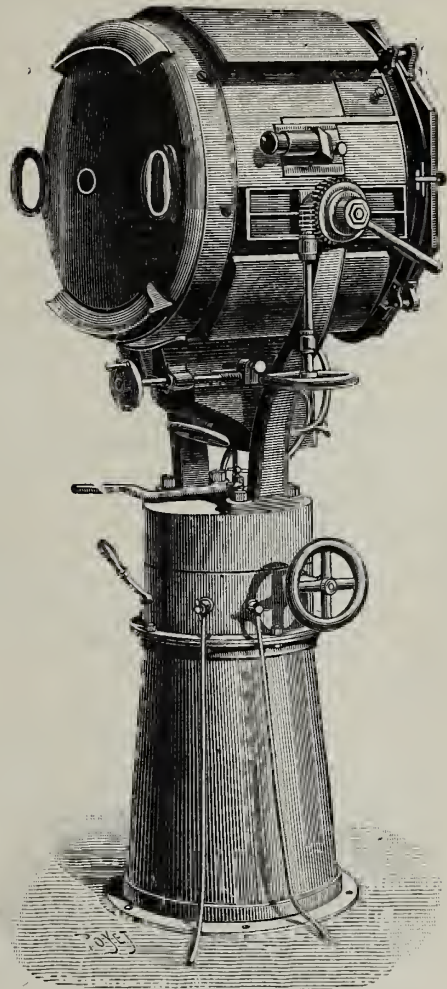


Fig. 24. — Projecteur Breguet.

Sous le plateau mobile sont fixés des balais de prise de courant reliés à deux bornes qui permettent d'amener le courant à la lampe. Ce plateau est monté sur galets de façon à permettre de modifier l'orientation du projecteur.

Un plateau fixe porte le chemin de roulement des galets du plateau mobile, un interrupteur et deux bornes d'attache des câbles venant de la source du courant.

La manœuvre du plateau mobile se fait à l'aide d'une vis tangente qui engrène avec une roue hélicoïdale montée sur ce plateau.

La lampe à arc placée à l'intérieur du cylindre du projecteur est à charbons horizontaux.

Cette lampe (*fig.* 25) se compose de deux chariots montés sur quatre galets chacun. Le chariot supérieur A porte le charbon positif *a* et roule sur les deux rails *b*. Un petit volant permet de régler la mise au point du charbon positif.

L'un des deux rails reçoit le courant par une bande de cuivre rouge attachée à la borne de prise de courant positif P.

Sur le chariot inférieur C est fixé le porte-charbon négatif *c* également monté sur quatre galets roulant sur deux rails *d*. Le courant y arrive par une bande de cuivre rouge qui est reliée à la borne N.

Le passage du courant entre les chariots et les rails est obtenu par des frotteurs. Les rails sont montés par deux sur la plaque supérieure *f*, mais bien isolés l'un de l'autre et de cette plaque.

Les chariots reçoivent leur mouvement chacun par un pignon engrenant avec une crémaillère du chariot. Chacune des deux crémaillères est isolée de son chariot. Les deux pignons sont montés sur le même arbre vertical G, à l'extrémité inférieure duquel est goupillée une roue dentée H.

Un petit moteur électrique M, disposé de telle sorte que l'arbre de son induit, taillé en

pignon, pénètre librement dans l'arbre G, pivote dans la plaque de base de la lampe. Les mouvements de l'induit sont ainsi transmis par un intermédiaire *i* à la roue dentée H.

Il résulte de ce montage que les moindres mouvements de l'induit sont transmis à la roue dentée H et de là aux chariots A et C.

Le rapprochement des deux chariots est obtenu par le moteur, tandis que l'écartement est commandé par un ressort à spirale enfermé dans le barillet B.

Sur l'enveloppe de ce barillet est taillée une couronne dentée qui engrène avec une crémaillère taillée dans un côté du chariot C.

On peut régler la tension du ressort à spirale à l'aide d'une roue dentée et d'une vis tangente.

Quand le courant ne passe pas dans l'induit, le barillet agit pour écarter les chariots ; au contraire, si l'induit est traversé par le courant, il rapproche ces chariots.

Le relais R sert à envoyer ou à couper le courant dans l'induit du moteur M.

Cette lampe peut être manœuvrée soit à la main, soit automatiquement. A cet effet, dans la couronne dentée du barillet, peut engrener une vis tangente fixée sur un arbre K, sur lequel on peut agir de l'extérieur de la lampe en manœuvrant un volant. Cet arbre est monté dans un support articulé qui est maintenu écarté par un ressort en boudin. Si l'on veut manœuvrer la lampe à la main, il suffit de rapprocher ce support; on engrène alors la vis tangente avec la couronne dentée au moyen d'un doigt et d'une petite poignée *l*, placée extérieurement, qu'on tourne sur la lettre M (main). En même temps qu'on engrène la vis tangente, on rompt automatiquement le circuit du moteur.

Au-dessus du porte-charbon positif est disposé un cendrier *m* surmonté d'un demi-cercle en fer doux ; celui-ci est destiné à diriger l'arc de façon à obtenir une taille régulière du charbon positif.

Le bouton *n* commande un cliquet qui sert à maintenir les charbons à une faible distance en cas d'extinction. Pour changer les charbons, on presse sur ce bouton et les porte-charbons s'écartent rapidement de toute leur course.

En plaçant la petite poignée *l* sur la lettre A, la lampe est disposée pour marcher automatiquement.

Au repos, les charbons sont écartés par le ressort du barillet B d'environ 5 à 6 mm et le cratère du charbon positif doit être placé à fleur du fer doux en demi-cercle qui, alors, l'entoure. Quand on ferme l'interrupteur, un courant dérivé passe dans les bobines du relais, l'armature est attirée, le court-circuit du moteur établi sur la vis *v* est rompu et un autre courant dérivé passe au collecteur du moteur pour sortir par l'inducteur et retourner, par la masse, au pôle négatif.

La différence de potentiel étant maximum, l'induit du moteur tourne rapidement en sens contraire du mouvement du barillet et rapproche les charbons par l'intermédiaire des roues dentées I et H qui ralentissent le mouvement.

Dès que les charbons se touchent, le relais lâche son armature, qui est rappelée par un ressort antagoniste ; le court-circuit de l'induit du moteur est rétabli en *v* et le moteur s'arrête brusquement.

Le ressort du barillet, agissant seul, écarte les charbons en donnant à l'arc la longueur correspondant à une différence de potentiel déterminée à l'avance par le réglage du ressort antagoniste du relais.

En marche, comme le barillet tend toujours à écarter les charbons, la moindre augmentation de longueur de l'arc a pour effet de provoquer l'attraction de l'armature du relais et, par suite, la mise en route du moteur qui rétablit la longueur normale.

S'il y a extinction de la lampe, les charbons s'écartent immédiatement.

On fait varier le régime de marche de la lampe en modifiant la tension du ressort antagoniste du relais.

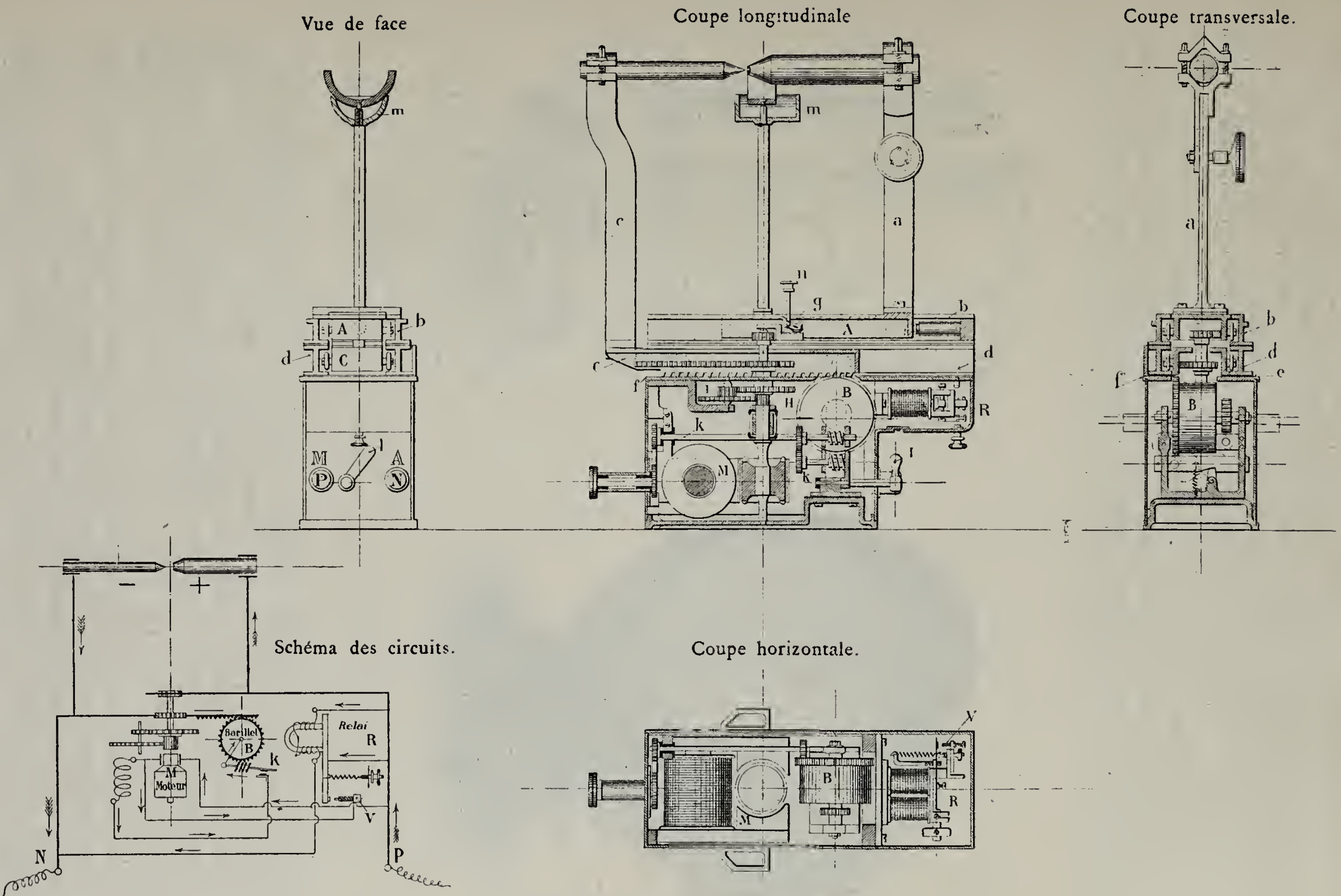



Fig. 25. — Lampe du projecteur Breguet.

**Projecteur Schuckert.** — Ce projecteur (*fig.* 26), construit par la Société anonyme d'Électricité de Nuremberg et qui figurait à l'Exposition de 1900, se compose d'une cage en tôle, suspendue sur tourillons, qui contient le miroir, la lampe à arc et les différents appareils optiques, d'un tablier en fonte qui reçoit tous les engrenages et mécanismes nécessaires pour provoquer les mouvements de l'appareil, ainsi que les frotteurs qui amènent le courant à la lampe, et enfin d'un socle à billes qui supporte le tablier et dans lequel sont logés les électromoteurs. Les figures 28 et 29 montrent les détails de construction de ce projecteur.

La cage est en forme de cylindre à axe horizontal. Ce cylindre est fermé à sa partie postérieure par le miroir dont l'axe optique coïncide avec celui du cylindre ; la partie antérieure porte un diaphragme à iris et un disperseur double. La lampe est suspendue sous un évidement

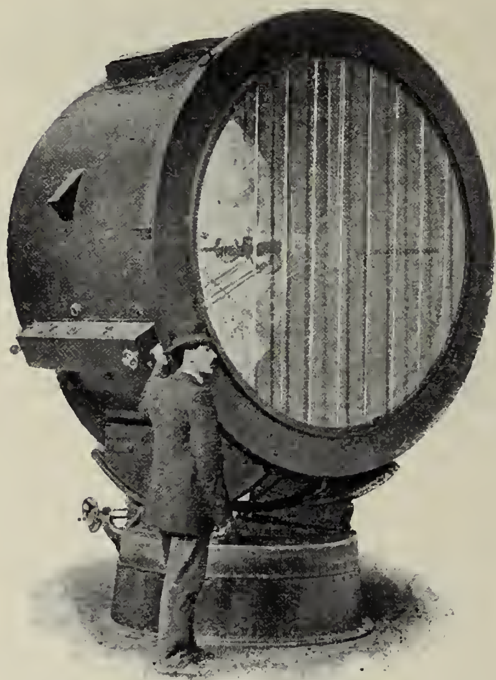


Fig. 26. — Projecteur Schuckert.

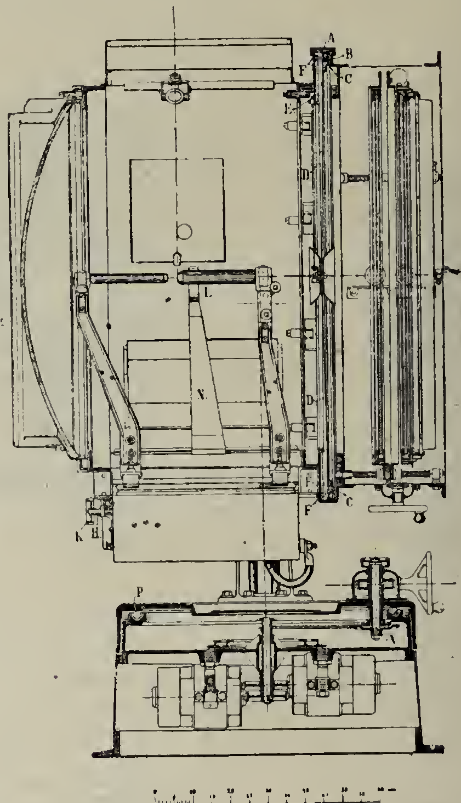


Fig. 27.
Détails de construction du projecteur Schuckert.

ménagé dans la paroi inférieure du cylindre ; à cet effet, le corps de cette lampe porte des languettes qui viennent coulisser dans des rainures fixées sous le cylindre. Le coulissage qui se produit dans le sens de l'axe de la cage permet d'amener le cratère du charbon positif au foyer du miroir. Les mouvements de la lampe sont commandés par un volant à main.

La ventilation de la cage est obtenue par la combinaison d'une cheminée d'appel, placée à la partie supérieure, avec des ouvertures fermées par des jalousies percées dans la partie inférieure.

Pour amener le centre de gravité de l'appareil sur l'axe des tourillons, les supports de ces tourillons peuvent glisser chacun sur deux tiges d'acier solidaires de la cage.

Les mouvements d'inclinaison de la cage sont commandés par une roue dentée, actionnée mécaniquement, qui engrène avec un segment denté fixé à la partie inférieure de la cage, à droite.

Le miroir est en verre taillé sur les deux faces suivant une parabole et, par suite, d'épais-

seur uniforme. Il est argenté sur la face postérieure et il repose, par l'intermédiaire d'une feuille de carton d'amiante, dans une monture de fonte.

La lampe est à réglage automatique et à réglage à la main à volonté; les crayons sont horizontaux. Le mécanisme de réglage automatique se compose de deux électro-aimants : l'un, monté sur le circuit principal, est destiné à l'allumage; l'autre, monté en dérivation, au réglage.

L'électro-aimant d'allumage 1 et 2 (*fig.* 30 et 31) comporte une armature mobile 3 reposant sur deux pivots, dont une des extrémités est reliée à deux ressorts en boudin fixés au corps de la lampe. La vis sans fin 4 suit les mouvements de cette armature. Sur l'axe vertical 5 sont fixées deux roues 6 et 7, dont la dernière engrène avec les deux crémaillères 8 et 9 qui supportent les porte-charbons.

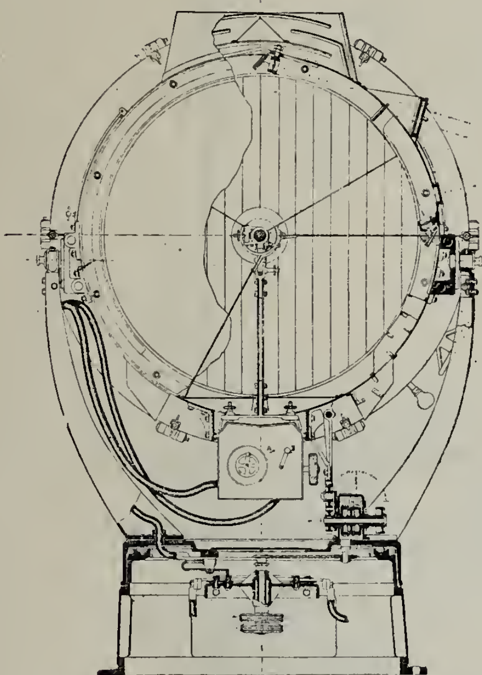


Fig. 28.
Détails de construction du projecteur Schuckert.

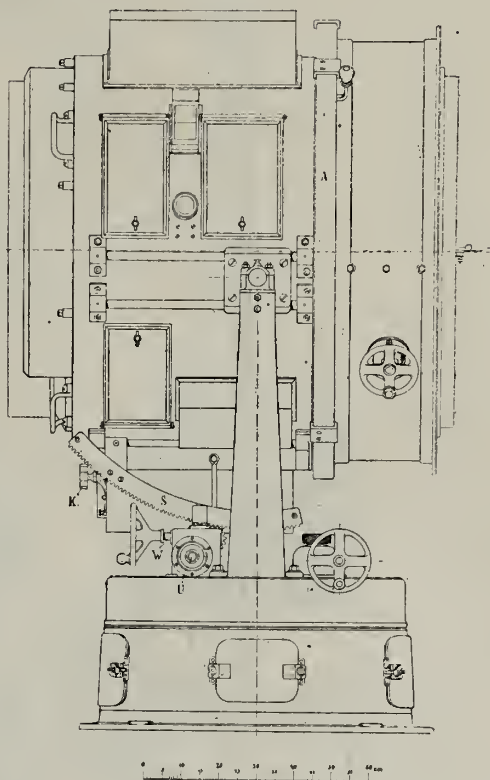


Fig. 29.
Détails de construction du projecteur Schuckert.

L'électro-aimant de réglage 10 est fixé sur le plateau inférieur de la lampe. L'armature 13 de cet électro-aimant se meut dans une équerre entre le contact 18 et les pôles de l'électro-aimant; elle est pourvue d'un contact élastique 12 et pressée sur la butée 17 par deux ressorts en boudin 16, à tension réglable par les vis 14 et 15. Le courant qui traverse l'enroulement est interrompu chaque fois que l'armature 13 est attirée et il est rétabli aussitôt par les ressorts antagonistes 16. Le cliquet 19, fixé à l'armature, glisse sur les dents du rochet 20, solidaire de l'axe 4, toutes les fois que l'armature s'abaisse ; quand elle se relève, ce cliquet fait tourner la vis sans fin 4 et le mouvement est transmis aux crémaillères par l'intermédiaire des roues 6 et 7.

Si, au moment de la fermeture du circuit de la lampe, les charbons sont écartés, l'électro-aimant de réglage, qui est fortement excité, attire son armature, qui est rappelée aussitôt par les ressorts 16. Le mouvement de va-et-vient qui en résulte rapproche les charbons jusqu'au contact. L'électro-aimant d'allumage agit alors sur les crémaillères pour provoquer l'écart néces-

saire à la formation de l'arc. Le réglage s'effectue dès que le courant dans l'électro-aimant en dérivation 10 est devenu suffisant pour que son armature puisse vaincre la tension des ressorts antagonistes 16. Le rapprochement qui se produit par l'intermédiaire de la vis sans fin 4 se fait par très petits déplacements à intervalles très rapprochés; il est par suite très régulier.

Le doigt 21, placé à l'extrémité de la crémaillère positive 9, en soulevant le ressort 22, rompt le courant dans l'électro-aimant 10 et arrête le fonctionnement de la lampe quand les charbons sont consumés jusqu'à une longueur déterminée.

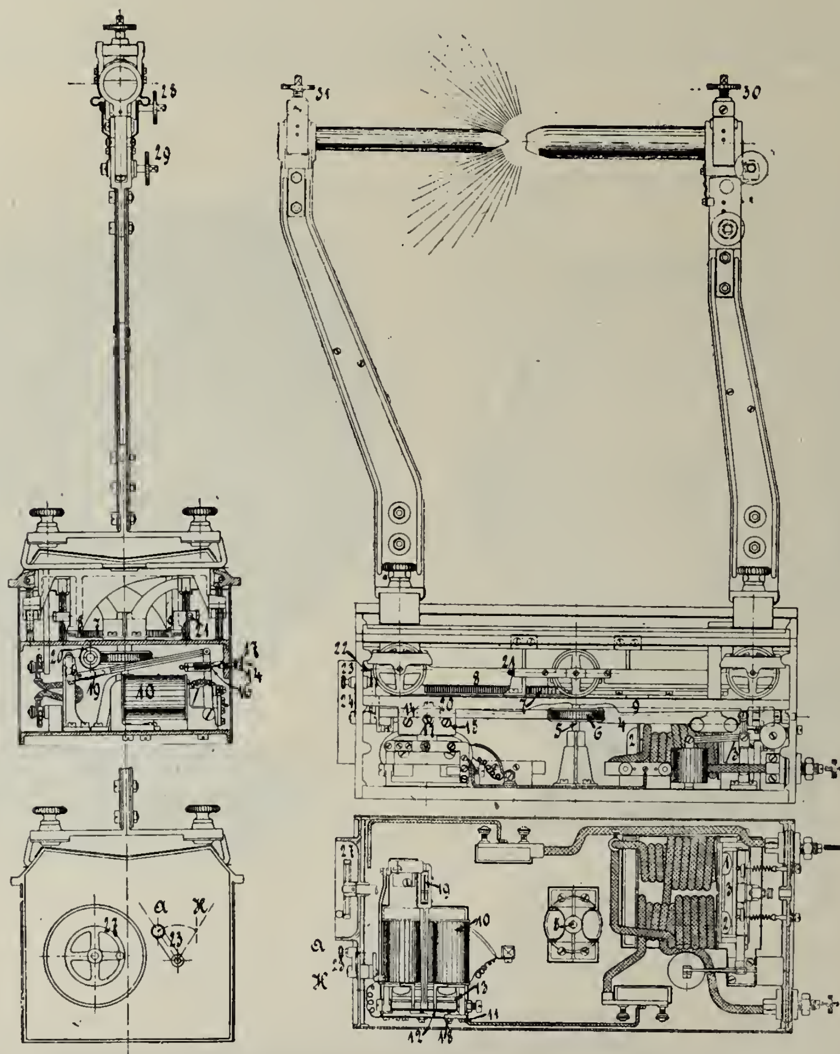


Fig. 30. — Lampe du projecteur Schuckert.

Le levier 23 est destiné à embrayer ou à débrayer le mécanisme de réglage automatique. Le réglage à la main se fait à l'aide du volant 27.

Pour redresser l'arc, qui tend à être dévié vers le haut par le courant d'air chaud qui circule dans la cage, on emploie un segment en fer doux, qui est placé à la partie inférieure et le plus près possible de l'arc et disposé concentriquement au charbon positif. Ce segment est aimanté par le courant qui produit l'arc et il a pour effet de ramener l'air vers le bas.

La cage peut être fermée à sa partie antérieure par un diaphragme à iris qui permet d'occulter plus ou moins le faisceau lumineux : l'occultation complète est obtenue par la jonction

des lames du diaphragme contre un disque central qui est fixé dans la portion du faisceau qui se trouve occulté par le charbon négatif.

A l'avant de la cage se trouve un disperseur double qui permet de réduire la portée du faisceau lumineux en l'étalant plus ou moins. Ce disperseur se compose de deux systèmes de lentilles qui peuvent être écartés ou rapprochés l'un de l'autre, de façon à passer du faisceau concentré au faisceau divergent ou inversement.

Une jalousie, formée de lames d'acier verticales, sert à faire les signaux à grande distance par occultation du faisceau lumineux.

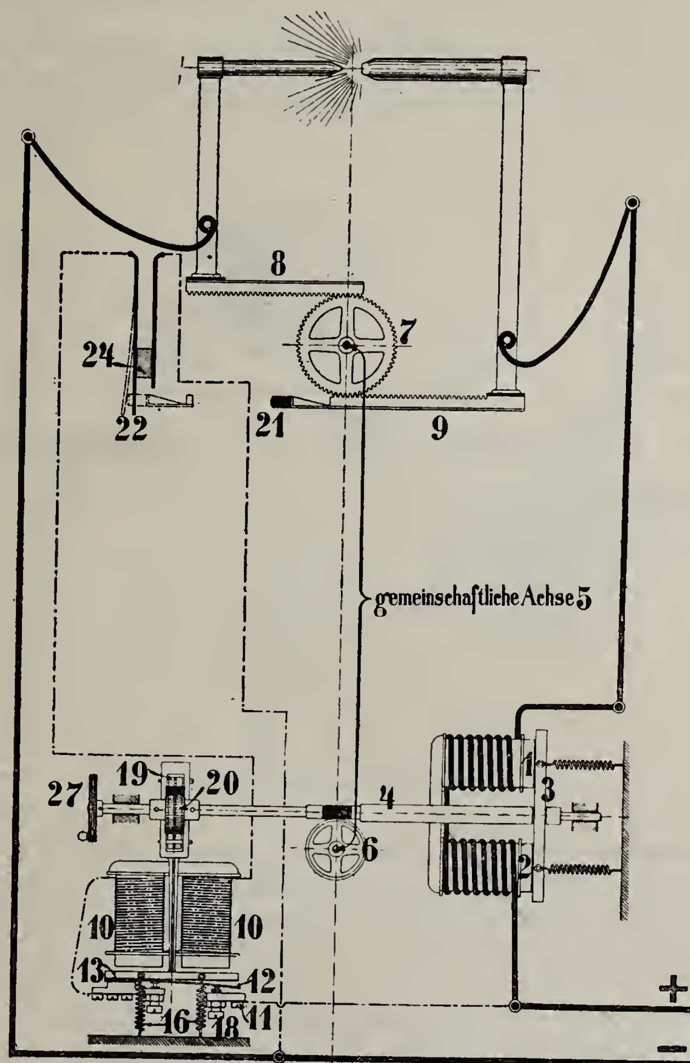



Fig. 31. — Schéma des connexions de la lampe Schuckert pour projecteur.

Pour pouvoir, à chaque instant, contrôler la forme du cratère, l'image de l'arc est projetée sur un écran en verre dépoli placé en haut et à droite de la cage et, en outre, deux regards circulaires, fermés par des verres foncés, sont disposés de chaque côté de cette cage vis-à-vis du foyer.

Le tablier en fonte, au-dessus duquel est placée la cage, est en forme de chapeau ; il porte deux montants en bronze, à la partie supérieure desquels reposent les tourillons du projecteur. Il repose par sa partie inférieure sur des billes qui sont logées dans une rainure ménagée dans le socle ; il est guidé et centré par une autre série de billes qui se trouvent entre la paroi de ce tablier et le socle.

Le tablier supporte tous les engrenages et mécanismes d'embrayage pour les mouvements d'inclinaison et d'orientation.

Les mouvements d'inclinaison sont commandés par un moteur placé dans le socle. Ce moteur actionne une roue dentée qui, par l'intermédiaire d'une chaîne et d'une autre roue dentée, entraîne un arbre portant une vis sans fin. Cette vis, qui traverse le tablier, engrène avec un pignon fou sur un arbre creux ; sur cet arbre est fixée une roue dentée qui attaque le segment denté adapté à la cage. L'entraînement se fait par un plateau à friction, commandé par une tige actionnée par un écrou qui traverse l'arbre creux et vient serrer ce plateau contre une roue folle quand l'écrou est tourné vers la gauche.

Pour effectuer la manœuvre à la main, on tourne l'écrou vers la droite et le plateau est alors accouplé avec une seconde roue folle montée sur le même arbre creux : la manœuvre se fait alors par un volant à main. Entre les deux positions de l'écrou, la cage peut être mue à la main librement.

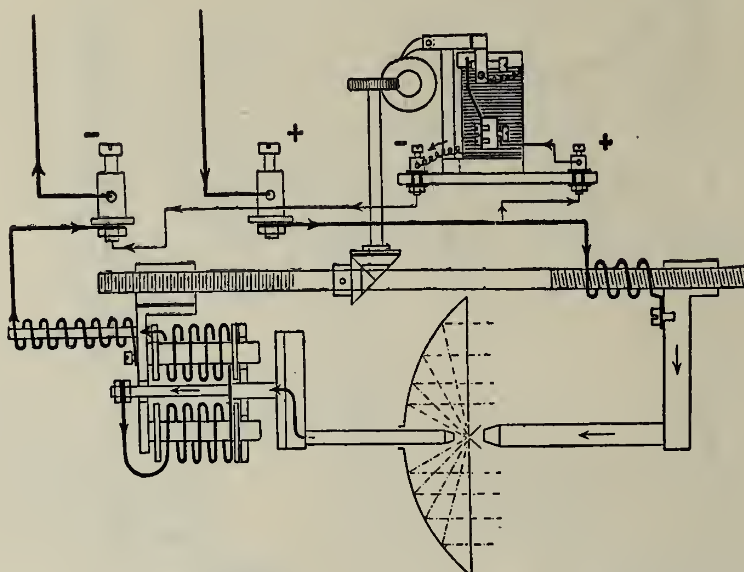



Fig. 32. — Projecteur Kœrting et Mathiesen.

Les mouvements d'orientation sont obtenus aussi par un plateau à friction contre lequel vient s'appliquer une roue dentée qui reçoit son mouvement d'un moteur électrique.

Le tablier porte les frotteurs qui amènent le courant à la lampe.

Le socle du projecteur se compose d'une couronne supérieure, d'un cône en tôle et de la couronne de base. Une traverse, fixée à la couronne supérieure, reçoit les bagues sur lesquelles glissent les frotteurs et supporte les électromoteurs avec leur mécanisme.

Ces projecteurs peuvent être commandés électriquement à distance à l'aide d'un commutateur à une ou deux manettes et de rhéostats. Comme les moteurs électriques employés sont à excitation séparée, leur vitesse se règle en faisant varier le courant dans l'excitation et dans l'induit à volonté. Pour arrêter les moteurs, les électro-aimants étant constamment en circuit, on coupe le circuit principal, puis on met l'induit en court-circuit.

**Projecteurs de la maison Kœrting et Mathiesen.** — Ces projecteurs sont de deux types : l'un comporte une lampe à réglage automatique ; dans l'autre type, le réglage de la lampe se fait à la main.

Dans tous ces appareils, les lampes à arc sont à crayons horizontaux ; les réflecteurs en métal blanc peuvent être manœuvrés de l'extérieur et l'ensemble de la partie optique peut tourner autour de deux axes, l'un vertical, permettant de placer l'instrument dans toutes les

orientations possibles, l'autre horizontal, pour obtenir le réglage de l'inclinaison. Ils peuvent être montés avec divers modèles de réflecteurs de courbures variables et être munis de disperseurs et de verres colorés.

Le schéma (*fig.* 32) représente le montage de la lampe à réglage automatique. Dans cette lampe, l'allumage est obtenu par un solénoïde en série, dont l'armature mobile est solidaire du porte-charbon négatif; le réglage se fait par une bobine à trembleur montée en dérivation. L'armature mobile de cet électro-aimant actionne, à chaque attraction, une roue à rochet qui commande par une série d'engrenages une vis à deux filets opposés. Sur cette vis sont montés d'un côté le porte-charbon positif, de l'autre l'électro-aimant d'allumage.

**Projecteurs de la Stralsunter Bogenlampen Fabrick.** — Cette maison exposait des projecteurs analogues à ceux que nous venons de décrire ; mais nous n'avons pu nous en procurer une description exacte.

---

## III

# APPLICATIONS A L'HORLOGERIE

PAR Georges DARY

---

### HORLOGE ÉLECTRIQUE THURY

Si nous en exceptons les mouvements pendulaires entretenus électriquement, nous savons que l'horlogerie électrique ne comprend que la construction de récepteurs actionnés par des courants que transmet à distance une horloge distributrice ordinaire; cette dernière est alors munie de contacts plus ou moins bien disposés.

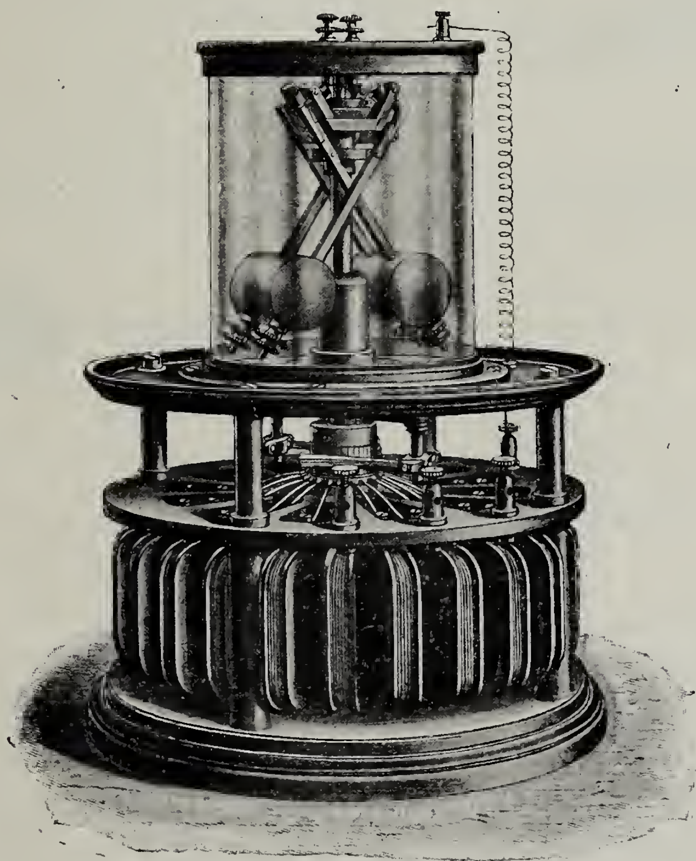


FIG. 1. — Horloge électrique Thury.

Tout autre est l'horloge exposée par M. R. THURY, de Genève. Son principe est exclusivement fondé sur les actions électriques; c'est une solution tout à fait nouvelle de la question.

Dans l'horloge de M. THURY (*fig.* 1), l'échappement est supprimé et remplacé par un

pendule conique; cette suppression permet à la fois de disposer d'une puissance motrice plus considérable que dans les horloges ordinaires et, en outre, d'obtenir un mouvement circulaire absolument uniforme, tandis que le transformateur du mouvement alternatif du pendule oscillant n'est jamais parfaitement réalisé, malgré la délicatesse des organes.

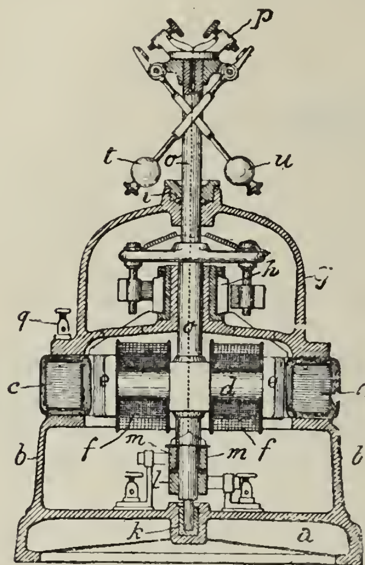



Fig. 2. — Horloge électrique type, système Thury. — Élévation.

Le principe de l'horloge électrique Thury consiste donc dans le réglage du moteur électrique à l'aide d'un pendule conique spécial. L'horloge-type ou centre horaire se compose (*fig.* 2 et 3) d'une dynamo-moteur électrique à axe vertical. L'induit fixe *c* est constitué par un anneau Gramme-Paccinoti, que supporte le socle *b* de l'appareil. L'inducteur, qui se compose d'un noyau de fer doux *de*, est fixé en son centre par un axe vertical creux *o*; ce noyau porte deux enroulements distincts *f*, dont l'un sert au réglage; l'autre est constamment traversé par un courant continu fourni par une source d'énergie quelconque. Les deux enroulements sont bobinés en sens inverse. Le collecteur fixe est supporté par un plateau disposé au-dessus de l'anneau qui sert aussi à maintenir le coussinet supérieur *i* de l'arbre vertical; la partie inférieure de cet arbre porte sur une crapaudine *k* montée sur le socle *b* de l'appareil. Le courant continu est amené au moteur par deux bagues *m* et *e* fixées sur l'axe; il est ainsi distribué aux bobines inductrices et à deux balais mobiles reliés à l'armature fixe. Quant au pendule conique à deux branches *t*, *u* et à bras croisés, il est monté sur le prolongement de l'arbre vertical et est construit de telle sorte que son isochronisme soit conservé sous un angle assez étendu.

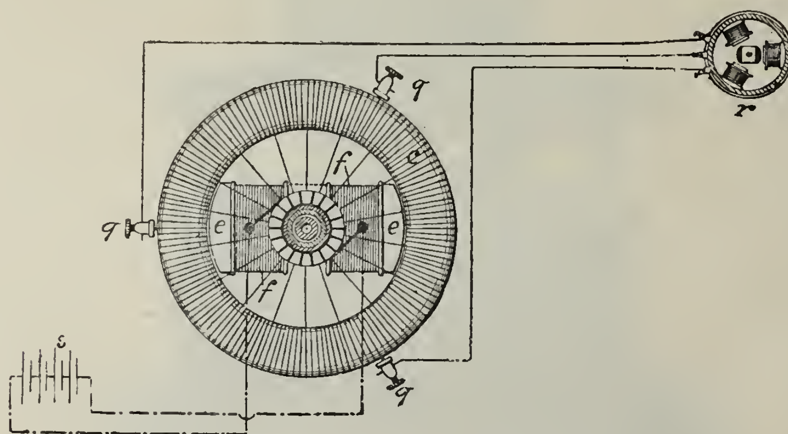



Fig. 3. — Horloge électrique type, système Thury. — Plan.

Les bras de ce pendule portent des contacts réglables *p* reliés à l'enroulement de réglage de l'inducteur; ces contacts se trouvent rompus dès que, par suite d'une augmentation de vitesse dans le moteur, l'écart du pendule dépasse une limite déterminée. L'interruption de courant s'effectue dans l'enroulement de réglage sans étincelle appréciable; il a pour effet d'augmenter l'intensité du champ magnétique du moteur et, par suite, de réduire sa vitesse; les masses du pendule ayant un poids considérable, leur force vive suffit à compenser les variations de vitesse qui tendent à se produire entre deux réglages consécutifs. Les récepteurs

sont commandés à distance au moyen du courant fourni par l'induit (*fig.* 3). A cet effet, trois prises de courant $q$ se trouvent disposées à 120° l'une de l'autre sur le bobinage de l'induit et sont reliées à de petits moteurs triphasés synchrones composés d'un aimant permanent en fer à cheval monté sur pivot et de trois bobines induites reliées entre elles par un fil commun. Quand ces bobines sont traversées par les courants triphasés provenant de l'horloge-type régulatrice, le champ tournant qui se produit entraîne l'aimant mobile et ce dernier se meut alors synchroniquement avec l'horloge-type.

Ces récepteurs ont donc un mouvement absolument continu et uniforme ; ils constituent, par suite, des horloges parfaites, tandis que les récepteurs électriques ordinaires fonctionnent par des émissions de courant plus ou moins espacées et ne donnent l'heure qu'avec une approximation correspondant à l'intervalle compris entre deux émissions successives.

La consommation de courant par l'horloge régulatrice et par les récepteurs est extrêmement faible, ce qui se conçoit aisément, puisqu'en dehors de la minuterie le mécanisme ne comporte qu'un petit aimant monté sur pivot.

## PENDULE ENTRETENU ÉLECTRIQUEMENT, SYSTÈME CAMPICHE

Bien que M. H. Campiche, de Genève, ait exposé son ingénieux appareil dans la classe 27 sous le nom de régulateur électrique, nous avons préféré lui donner le titre ci-dessus comme désignant mieux le problème que le savant constructeur a résolu d'une manière si simple et si élégante ; ce titre définit en même temps l'invention et le classe immédiatement dans la foule déjà si nombreuse des horloges et des régulateurs électriques.

Nous savons qu'entretenir un pendule, c'est lui restituer, au fur et à mesure qu'il la perd, l'énergie absorbée par les frottements dans l'air et les résistances de la suspension, de manière à maintenir constante l'amplitude des oscillations ; entretenir électriquement un pendule, c'est demander à une source électrique l'énergie complémentaire qui est nécessaire à ce travail. Il existe deux moyens principaux pour entretenir électriquement le mouvement d'un pendule :

Ou bien le pendule lui-même est soumis directement à l'influence de l'énergie électrique et alors il est muni, soit d'une armature en fer doux, soit d'une bobine de fil isolé qui, oscillant avec lui, sont, en certains points de sa course, soumis aux attractions ou aux répulsions d'organes magnétiques. Dans ce cas, ce sont des horloges électriques dites à réactions directes.

Ou bien l'énergie électrique a pour fonction de soulever à intervalles réguliers, souvent à chaque oscillation du pendule, de petits poids ou des ressorts qu'elle abandonne ensuite à eux-mêmes, et cela à un moment où ceux-ci, en s'appuyant sur des bras fixés au pendule, peuvent restituer à ce dernier la portion de force vive qu'il a perdue pendant l'oscillation. Ces horloges sont dites à réactions indirectes.

Le procédé employé par M. H. Campiche rentre plutôt dans cette deuxième catégorie, mais en comportant d'utiles modifications. En effet, pour restituer à un pendule la force vive qu'il a perdue dans le travail effectué, il importe d'adopter une méthode qui ait le moins possible d'influence perturbatrice sur la loi de son mouvement et dont l'action soit indépendante de l'intensité du courant employé ainsi que de ses variations. Or le système à réactions indirectes a le grand avantage de rendre la marche du pendule indépendante de ces variations, puisque les impulsions qui lui sont communiquées sont dues à une force constamment égale à elle-même. Mais, comme le plus souvent les fermetures du circuit ont lieu à chaque oscillation du pendule, la consommation du courant est très grande, sans compter tous les inconvénients qui en dérivent. En outre, ces impulsions sont toujours accompagnées de chocs brusques plus ou moins accentués qui compromettent au plus haut degré la régularité de marche des organes et rendent alors illusoire la constance de la force appliquée à l'entretien du pendule.

M. Campiche a évité soigneusement tous ces inconvénients et, comme on peut s'en convaincre en examinant la figure 4, il construit un régulateur électrique d'une simplicité et d'une précision absolument remarquables.

Sur le bâti *a* sont fixées les trois pièces principales du régulateur : les rouages *c*, le pendule *b* et l'organe électro-mécanique *hx*. Le pendule *b*, qui bat la seconde, est muni d'une lamelle d'acier *d*, terminée par une ancre et dont la position est déterminée à volonté et réglée par l'intermédiaire d'un coulisseau et d'une vis de pression. A chaque oscillation du pendule vers la roue *c*, cette tige à ancre la fait avancer d'une dent et, comme il y en a soixante, la révolution totale de la roue s'effectue exactement dans une minute.

Or cette roue *c* porte à l'extrémité d'un de ses rayons une mince goupille en platine qui, une fois par tour, vient toucher, pendant 8/10 de seconde, les deux contacts également en platine *g*, disposés de part et d'autre de la roue. Le circuit de la source électrique affecté à l'entretien du pendule se trouve alors fermé pendant cette courte période sur l'électro-aimant *h*.

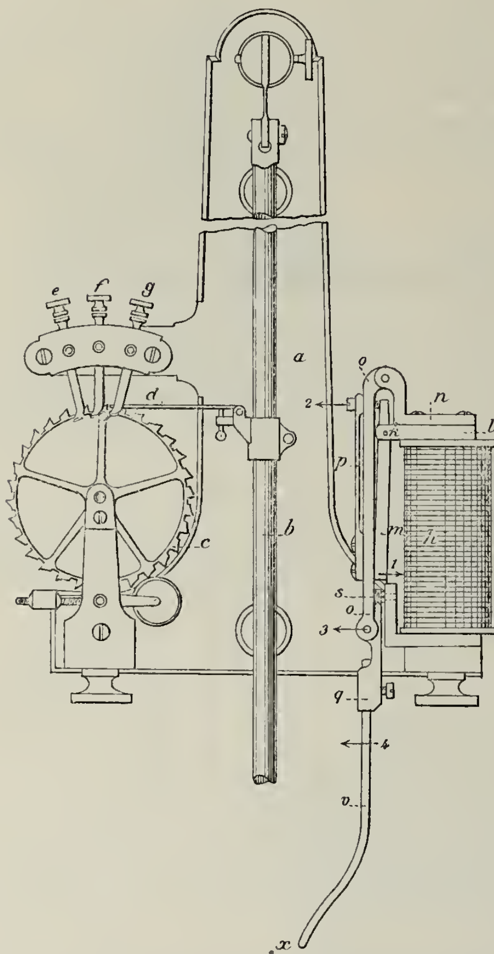



Fig. 4. — Pendule électrique, système Campiche.

Une petite molette bien équilibrée et placée à la partie inférieure de la roue dentée *c* remplit le rôle de sautoir et maintient cette roue sans la charger.

Quant aux deux autres contacts *e* et *f*, ils peuvent être affectés à la distribution de l'heure à des lignes de cadrans secondaires.

L'électro *h* attire et fait basculer son armature *km* et, par l'intermédiaire de pièces mobiles articulées *oq*, la lame flexible *vx* vient repousser le balancier *ab* et accentuer, s'il en est besoin, son oscillation pendant 8/10 de seconde ; cette lame flexible revient immédiatement dans sa première position sous l'influence du ressort *p*, dont la tension est réglée à volonté. Le point où le poussoir flexible *vx* vient donner une nouvelle impulsion au balancier n'est pas indiqué sur la figure ; d'ailleurs, il varie à volonté, car, au moyen de la vis *q*, on peut faire descendre ou remonter la lame flexible. De même le balancier est pourvu en un endroit convenable d'un petit coulisseau carré, tenu en place par une vis de pression, et sa surface plane, du côté de la lame flexible, est garnie d'une matière lisse et bien polie, de manière que l'impulsion s'effectue normalement et sans chocs.

Voilà donc tout le mécanisme, très simple, comme on le voit, du régulateur électrique Campiche. Le travail que l'on demande au pendule est extrêmement léger et, comme il est toujours constant et que la poussée électro-mécanique de la lame est toujours de même intensité, malgré les variations de courant qui peuvent survenir du fait de la source d'énergie, il est évident que la plus grande précision est nécessairement obtenue.

La synchronisation de plusieurs régulateurs ne présente plus aucune difficulté, puisque l'on pourra en brancher un nombre aussi grand que l'on voudra sur le même circuit. Tous les poussoirs électro-mécaniques agiront exactement ensemble et viendront donner leurs impulsions aux balanciers, qui battront rigoureusement la seconde tous ensemble. Dans la classe 27, M. Campiche avait disposé trois régulateurs merveilleusement synchronisés, en dépit des vibrations excessives communiquées aux planchers par toutes les machines du rez-de-chaussée et

les allées et venues du nombreux public au premier étage. La démonstration des qualités préconisées par M. Campiche n'en était que plus complète.

### PENDULE A RESTITUTION ÉLECTRIQUE CONSTANTE DE M. FÉRY

M. Féry, dans le pendule qu'il avait exposé, classe 67, aux Invalides, a cherché à réaliser les conditions suivantes :

1° Restituer au pendule sa force vive au moment où il a son maximum de vitesse, c'est-à-dire dans la verticale ;

2° Diminuer autant que possible le collage électrique, soit d'adhérence entre les points de rupture du circuit, phénomène qui a été constaté même pour des courants inférieurs à 0,005 ampère ;

3° Supprimer les troubles que cause, dans l'isochronisme du pendule, le contact qui amène le courant ;

4° Rendre la quantité d'énergie, restituée à chaque oscillation, constante et indépendante de l'état de la pile généralement employée comme source d'électricité.

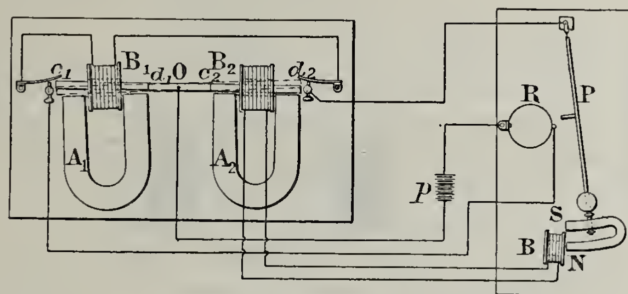



Fig. 5. — Pendule électrique, système Féry.

Pour satisfaire à cette dernière condition, M. Féry actionne son pendule par un transformateur spécial donnant des courants induits et fournissant une quantité d'électricité indépendante de la source d'énergie et réglable à volonté.

Ce transformateur comprend, en principe, deux aimants $A_1$, $A_2$ (*fig.* 5), munis chacun d'une armature de fer doux $c_1d_1$ et $c_2d_2$, solidaires l'une de l'autre et constituant une palette pivotant en O. Cette palette, mobile dans l'axe de deux bobines fixes $B_1$, $B_2$, donne naissance, par son déplacement limité et réglable, à des courants induits qui servent à actionner le pendule. L'une des bobines, $B_1$, est motrice ; elle reçoit les courants alternativement renversés de la pile $p$ et produit ainsi un mouvement alternatif de la palette. La seconde bobine, $B_2$, qui constitue le secondaire de ce transformateur, est parcourue également par des courants alternés produisant à chaque oscillation une quantité constante d'électricité qui est envoyée au pendule lorsqu'il passe par la verticale.

L'impulsion brusque qui entretient le pendule est donc due à la réaction de l'aimant NS, fixé au pendule sur la bobine fixe B, recevant les courants du transformateur restituteur.

Le calcul montre et l'expérience vérifie que, pour obtenir le maximum d'amplitude avec un restituteur donné, il faut rendre égal à celui de l'air et de la dispersion l'amortissement magnétique que le pendule éprouve dans l'oscillation de l'aimant NS dans la bobine B. M. Féry a également étudié l'influence du ressort circulaire R amenant le courant à l'appareil et il a trouvé qu'il était possible de lui donner un réglage tel que le pendule, qui avance normalement aux petits arcs et retarde aux grands, ait le retard maximum pour une amplitude moyenne. A ce moment du retard maximum, l'erreur due à une petite variation d'amplitude sera très faible ; le pendule peut être ainsi rendu isochrone pour des arcs assez grands, ce qui augmente sa puissance régulatrice.

Il faut remarquer que la faible durée de passage du courant n'entraîne qu'une dépense très minime d'électricité correspondant à une intensité moyenne de 0,001 ampère sous 10 volts.

### DISTRIBUTEUR ÉLECTRIQUE DE LA COMPAGNIE PARISIENNE DE L'AIR COMPRIMÉ POUR HORLOGES PNEUMATIQUES

Jusqu'ici la distribution de l'air comprimé dans les canalisations des horloges pneumatiques de Paris s'effectuait mécaniquement ; mais, la puissance étant limitée, la Compagnie a bien vite compris quels avantages elle recueillerait en adoptant l'énergie électrique pour lancer dans ces diverses canalisations l'air comprimé parti d'un réservoir et qui doit agir sur les divers cadrans du réseau à des intervalles égaux. C'est donc un distributeur-relais fonctionnant électriquement qu'avait exposé cette Compagnie à la classe 96 de l'Horlogerie, aux Invalides. Il est simple et ingénieux à plus d'un point de vue.

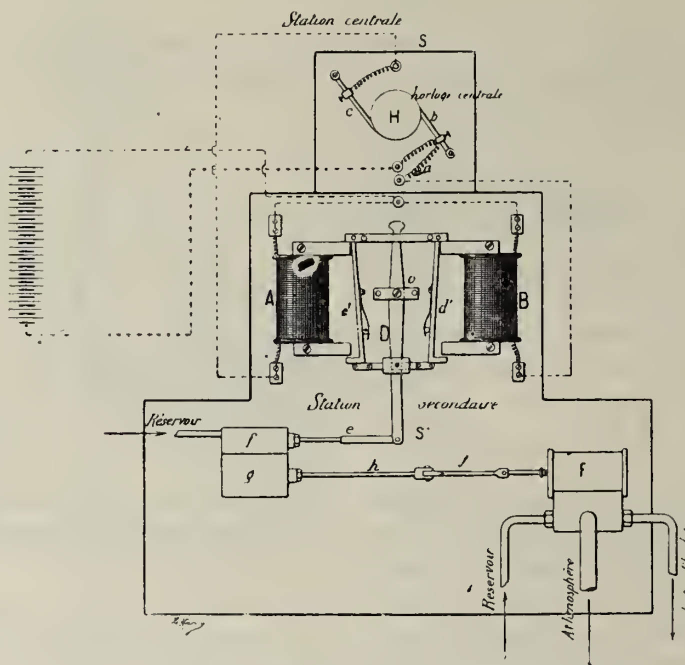



Fig. 6. — Schéma des connexions d'une station secondaire.

Pour bien faire comprendre le fonctionnement et l'utilité de cette commande électrique, il nous faut d'abord indiquer sommairement le principe du système à air comprimé employé actuellement par la Compagnie parisienne et desservant les Ier, IIe, IIIe, IVe, VIIIe, IXe et Xe arrondissements. La distribution de l'heure dans des horloges multiples comporte nécessairement, quel que soit le mode adopté, une horloge centrale ; ici comme toujours ce principe a été respecté, et l'horloge-type en question est située rue Sainte-Anne. Elle est à remontage automatique et peut être considérée comme un régulateur, de la marche duquel dépendent tous les cadrans secondaires. Ce régulateur central actionne, par l'intermédiaire d'un système spécial de déclenchement à came, un arbre qui effectue deux demi-révolutions très rapides par minute. Sur cet arbre est calé un excentrique qui commande la tige du tiroir d'un cylindre à air comprimé dont le piston actionne à son tour un grand tiroir de distribution. L'air comprimé provenant des réservoirs est en charge sur les deux tiroirs, à une pression moyenne de 700 gr : cm$^2$.

Après la demi-révolution, le tiroir met en communication le réservoir d'air comprimé avec les canalisations des horloges secondaires. Quant au mécanisme qui actionne les aiguilles de ces

cadrans, il consiste simplement en petits soufflets, reliés aux rochets qui commandent les minuteries.

La deuxième demi-révolution de l'arbre a pour fonction de laisser l'air, qui se trouvait dans les conduites, s'évacuer librement dans l'atmosphère.

On comprend qu'un système semblable ne puisse assurer un service direct, sans relais, que dans un rayon limité. Ce rayon, dans le cas qui nous occupe, atteint un maximum de 3 km, à cause du temps pris nécessairement par l'alimentation et la vidange des canalisations, et à cause également des fuites inévitables et des pertes de charge inhérentes à toute conduite de quelque longueur, qu'elle soit pneumatique, hydraulique ou électrique. En conséquence, si l'on voulait distribuer l'heure pneumatique dans tout Paris, par exemple, il faudrait diviser la ville en zones de 3 km de rayon et pourvoir chacune de ces zones d'une horloge centrale et d'un distributeur. La Compagnie Parisienne a donc évité cette difficulté en établissant son distributeur-relais électrique qui constitue une sous-station en quelque sorte et qui remplacera avantageusement ces stations centrales multiples qu'il faudrait d'abord mettre d'accord entre elles ; difficulté quasi insurmontable !

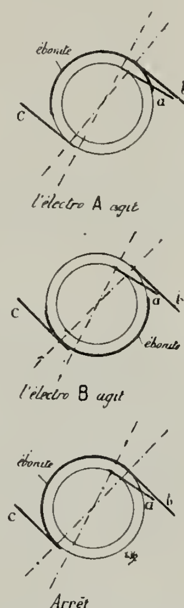



Fig. 8. — Détails des contacts de l'horloge centrale.

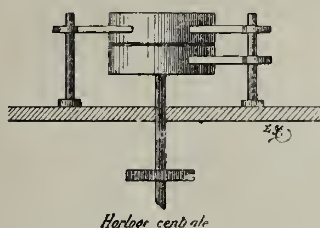



Fig. 7. — Détails des contacts de l'horloge centrale.

Dans le projet de la Compagnie, il n'y a donc qu'une seule station centrale comprenant l'horloge régulatrice, pourvue toujours, comme précédemment, d'un arbre à déclenchement portant l'excentrique de l'horloge et effectuant deux demi-révolutions par minute ; sur cet arbre sont disposées autant de touches de contact que l'on a de stations secondaires à desservir et qui sont installées vers le milieu de chaque zone de 3 km.

Ces sous-stations sont reliées à la station centrale par un circuit alimenté par une batterie de piles primaires ou d'accumulateurs ; elles comprennent chacune, comme matériel, deux électro-aimants, l'appareil de distribution et les réservoirs régulateurs d'air comprimé.

Examinons le fonctionnement d'une station secondaire S′ reliée à la station centrale S (*fig.* 6). Sur l'arbre H de l'horloge régulatrice s'appuient deux balais frotteurs *c* et *b*, qui lancent alternativement le courant de la batterie soit dans un sens, soit dans l'autre, suivant qu'ils appuient soit sur la bande métallique de l'arbre, soit sur la bande d'ébonite (*fig.* 8), qui couvre une demi-circonférence ; le frotteur *a* (*fig.* 7), toujours en rapport avec la masse métallique de l'arbre, complète le circuit.

A la première demi-révolution de l'arbre H, le courant est envoyé par le balai *c* dans l'électro-aimant A ; l'armature *d* est attirée et le levier D, auquel elle est fixée, suit son mouvement ; la tige *e* et le tiroir *f* se déplacent vers la gauche et l'air comprimé, provenant du réservoir, agit dans le cylindre *g* sur la face antérieure du piston, commandant ainsi le tiroir de distribution F par la tige *h* et la bielle *j* ; l'air comprimé est alors envoyé du réservoir dans la canalisation des horloges secondaires. Mais, avant la fin de la demi-révolution, les balais *b* et *c* touchent la bande d'ébonite (position 3 de la *fig.* 8) ; le courant est interrompu.

Alors se produit la seconde demi-révolution, le courant passe par l'intermédiaire du balai *b* dans l'électro-aimant B, qui attire son armature *d′* ; le levier D suit encore ce mouvement inverse ; le tiroir *f* se déplace en sens contraire ; l'air comprimé agit sur la face postérieure du piston *g* et la tige *h* avec la bielle *j* fait reculer le tiroir F, qui laisse alors l'air des conduites s'écouler dans l'atmosphère par le tube d'évacuation. Avant la fin de cette seconde demi-révolution, les balais reprennent toujours la position 3 de la figure 8 et le courant est de nouveau interrompu.

Ces diverses phases se produisent régulièrement toutes les minutes.

On voit donc la facilité avec laquelle une seule horloge centrale peut distribuer une heure unique à une infinité de cadrans pneumatiques disséminés dans toute une grande ville. Ce relais électrique ne va pas tarder à être appliqué à Paris. La Compagnie parisienne, cantonnée jusqu'ici sur la rive droite, va passer ces ponts et desservira une partie de la rive gauche, les Ve, VIe, VIIe arrondissements.

C'est encore un succès pour l'électricité, puisqu'une distribution rivale ne peut étendre son exploitation qu'avec son aide.

---

IV

# APPLICATIONS AUX CHEMINS DE FER

PAR G. BAIGNÈRES ET F. RODARY

---

Nous n'étudierons dans cette partie que les applications de l'électricité aux appareils de protection et de contrôle utilisés sur les voies de chemin de fer, ainsi que quelques applications électro-mécaniques.

## A] APPAREILS DE PROTECTION POUR LIGNES A DOUBLE VOIE

Les appareils spécialement employés pour assurer la circulation des trains sur les lignes à double voie très fréquentées sont les appareils dits de block-système ou de cantonnement. Pour leur application, la ligne est divisée en un certain nombre de sections consécutives, de longueurs variables entre 1 500 m et 10 km, dans chacune desquelles on ne doit pas admettre plus d'un train à la fois. Il doit donc y avoir une porte à l'entrée de chaque section, que l'on ouvrira seulement lorsqu'il n'y aura plus de train dans cette section, c'est-à-dire après que la porte de la section suivante aura été ouverte, puis refermée derrière le dernier train passé. Ces portes successives constituent des postes de block-système ; ils manœuvrent les signaux qui autorisent ou interdisent l'entrée de la section et ces signaux, dits de cantonnement, sont eux-mêmes sous la dépendance du poste suivant, qui seul peut permettre, en envoyant un courant électrique, de remettre ces signaux à voie libre.

**Appareils de block-système de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Le programme du block-système réalisé par la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée est le suivant :

Soient trois postes consécutifs A, B et C :

1° Le signal de cantonnement du poste A, mis à l'arrêt derrière un train qui continue sa marche sur B, s'enclenche automatiquement dans cette position et ne peut être libéré que par le poste suivant B ;

2° Ce poste B ne peut rendre voie libre à A qu'après avoir couvert avec son propre signal le train allant de B vers C ;

3° Ce poste B ne peut rendre voie libre à A qu'une seule fois par chaque opération du passage d'un train, c'est-à-dire mise successivement à voie libre et à l'arrêt du signal.

Appareil de block-système, système Rodary. — Voici comment sont réalisées les trois conditions indiquées ci-dessus, en faisant intervenir deux signaux, l'un en avant du poste, qui est le signal du cantonnement, et l'autre à l'arrière, qui sert à protéger un train arrêté au poste.

La figure 1 représente un appareil double, c'est-à-dire établi en B et relié avec les postes A et C.

*Condition* 1. — Le levier qui manœuvre le signal de cantonnement est rattaché mécaniquement à la règle T.

Cette règle T est représentée immobilisée par le verrou V entré dans l'encoche $t$ ;

or ce verrou peut être relevé par la bascule C, lorsque celle-ci se détache du noyau de la bobine B.

Cette action se produit lorsque la bobine B est parcourue par un courant électrique de sens convenable, qui crée aux deux extrémités de son noyau des pôles magnétiques de même nom que ceux de la fourchette C, polarisée d'une façon constante par l'aimant permanent A, d'où résulte une action de répulsion aidée du reste par le ressort R.

Après cela, la tige T peut être tirée vers la gauche pour mettre le signal à voie libre. Mais, dans son mouvement, cette tige a, grâce au profil de la platine D, relevé au passage le taquet E, qui applique C contre le noyau de la bobine B; lorsque T revient à sa première position, le verrou V, retombant dans l'encoche *t*, immobilise de nouveau la règle T et, par suite, le signal est rétabli à l'arrêt.

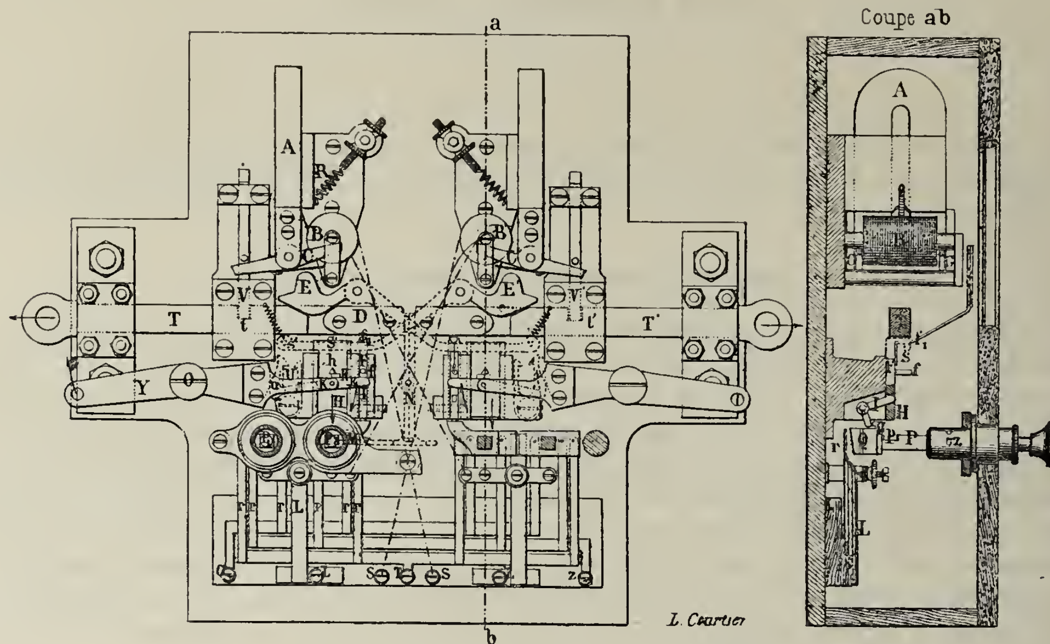



FIG. 1. — Appareil de block-système, système Rodary.

*Condition* 2. — Lorsque le signal d'entrée a été mis à l'arrêt, le balancier Y, qui est relié à son levier et oscille autour de l'axe O, occupe la position indiquée par la figure 1, et son autre extrémité K maintient soulevée la plaque H, mobile verticalement dans une glissière, en supportant la goupille *h* fixée sur cette plaque. Mais, lorsque le signal est effacé, Y se relève, K s'abaisse, H vient reposer dans l'encoche *p* du bouton-pressoir P (*fig.* de droite) et, par suite, empêche celui-ci d'arriver au contact des ressorts *r* pour envoyer le courant qui libérerait le signal de cantonnement du poste précédent.

On ne peut donc rendre voie libre que lorsque le signal d'entrée est à l'arrêt.

Récemment le balancier Y a été relié à la tige T, de façon que l'on puisse rendre voie libre seulement quand le sémaphore de cantonnement a été enclenché à l'arrêt.

*Condition* 3. — Ce signal venant d'être mis à l'arrêt derrière le train arrivé, la plaque H repose, comme on vient de le voir, par sa goupille *h* sur l'extrémité K, qui est à pied-de-biche avec articulation en *k*. Lorsqu'on pousse le bouton P pour rendre voie libre, sa saillie *g* (*fig.* de droite) vient appuyer sur l'articulation en équerre I qui abaisse la pièce F à glissière verticale, comme H.

Celle-ci, par sa goupille *f*, appuie sur K, qui s'incline autour de *k* en abandonnant la goupille *h* de la pièce H. Cette plaque, n'étant plus soutenue, tombe par son propre poids dans l'en-

coche $p$, lorsque le bouton est revenu à sa position normale, et immobilise celui-ci ; on ne peut donc rendre une seconde fois voie libre.

Nous n'insisterons pas sur le mode d'émission des courants, qui sont obtenus au moyen des boutons-pressoirs P, terminés par une tête en ébonite Q portant des plaquettes métalliques susceptibles de relier électriquement, d'après une combinaison donnée, les ressorts $r$ et L, de façon à envoyer sur la ligne des courants de sens convenable ; P, qui n'est libre que sous certaines conditions indiquées précédemment, sert à émettre le courant négatif libérateur ; $P_1$ envoie des courants positifs servant à des annonces et correspondances par sonneries conventionnelles.

*Remarque.* — On a été amené à solidariser la règle T avec le balancier Y, afin que ce soit finalement le mouvement de T qui, par l'intermédiaire de Y, libère le bouton P, seulement lorsque le sémaphore de cantonnement est lui-même bloqué à l'arrêt, au lieu que cet effet soit produit par le sémaphore d'entrée qui, lui, n'est pas bloqué ; il en résulte une plus grande sécurité.

Appareil de block-système, modèle 1899. — Cet autre appareil, qui remplit d'ailleurs le même programme que le précédent, est plus simple et peut être placé en plein air sur un support quelconque et même sur le fût du sémaphore de cantonnement. Voici comment il remplit les trois conditions énumérées (*fig.* 2) :

*Condition* 1. — La manette ou le levier de manœuvre du bras sémaphorique est relié à la manivelle M. Cette manivelle est goupillée sur l'axe O d'un secteur en fonte d'acier S, évidé et portant sur son contour extérieur une encoche E. Un verrou VV′, maintenu et guidé par deux coulisses G, G′, peut se mouvoir librement dans le sens vertical.

Lorsque le verrou tombe par son propre poids dans l'encoche E, le secteur S ne peut pas tourner autour de son axe O et la manivelle M est immobilisée dans sa position relevée. Le bras sémaphorique qui est relié à cette manivelle se trouve donc lui aussi immobilisé dans la position d'arrêt. Si, par suite du dispositif qui va être décrit, le verrou VV′ est soulevé, l'encoche E est dégagée, le secteur S peut tourner et la manivelle M ainsi que le bras sémaphorique correspondant peuvent être abaissés.

Pour obtenir le relèvement du verrou VV′, on a fixé sur ce verrou un goujon $a$ qui vient s'appuyer sur l'extrémité L d'une pièce $LL'_1L'_2$. Cette pièce se compose d'un corps en bronze terminé à l'une de ses extrémités par un bras L également en bronze et à l'autre extrémité par deux doigts $L'_1$ et $L'_2$ en acier. Chacun de ces doigts $L'_1$ et $L'_2$ est relié au moyen d'une articulation C à l'une des masses polaires d'un aimant permanent A en fer à cheval dont il constitue le prolongement.

La pièce $LL'_1L'_2$ pivote librement autour de l'articulation C ; mais sa course est limitée par deux barreaux en fer doux DD, D′D′, contre lesquels viennent les deux doigts $L'_1$, $L'_2$, de telle sorte que, quelle que soit la position de la pièce $LL'_1L'_2$, l'aimant se trouve toujours armé.

Sur le barreau de fer doux D′ est placée une bobine B, intercalée sur le fil de ligne. Un ressort R, fixé à la pièce $LL'_1L'_2$, tend à appliquer les doigts $L'_1$ et $L'_2$ sur le fer D ; mais sa tension n'est pas suffisante pour détacher ces doigts du fer doux D′ lorsqu'ils s'appuient sur celui-ci.

Lorsque les doigts $L'_1$, $L'_2$ sont appliqués contre le fer doux D′, le bras L est abaissé et le verrou VV′ s'engage dans l'encoche E. Le secteur S est immobilisé.

Si on envoie un courant négatif dans la bobine B, ce courant détermine dans le barreau de fer doux D′ une aimantation de même sens que celle de l'aimant A. Comme les pôles de même nom se repoussent, les doigts $L'_1$, $L'_2$ ne sont plus alors maintenus par le barreau D′ et la pièce $LL'_1L'_2$, rappelée par le ressort R, pivote autour de l'articulation C. Le bras L, en se relevant, soulève, au moyen du goujon $a$, le ressort VV′, qui dégage alors l'encoche E. Le secteur S est libre et la manivelle M peut être abaissée.

Si le courant envoyé est un courant positif, il détermine dans le barreau de fer doux D′ une aimantation de sens contraire à celle de l'aimant A ; comme les pôles de nom contraire s'attirent,

les doigts $L'_1$, $L'_2$ restent maintenus appliqués contre le barreau D′ et le verrou n'est pas déclenché.

Lorsque l'on abaisse la manivelle M, le talon V′ du verrou VV′ suit le contour intérieur du secteur S. Le profil de ce contour présente, en $p$, un renflement qui a pour effet, lorsque le talon V′ du verrou vient à son contact, d'exercer une pression de haut en bas sur le verrou et de le faire descendre. Dans ce mouvement de descente du verrou VV′, le goujon $a$ s'appuie sur le levier L, fait basculer la pièce $L'_1L'_2$, et les doigts $L'_1$, $L'_2$ viennent s'appliquer sur le barreau D′ contre lequel ils restent maintenus jusqu'à ce qu'un nouveau courant négatif soit envoyé dans la bobine.

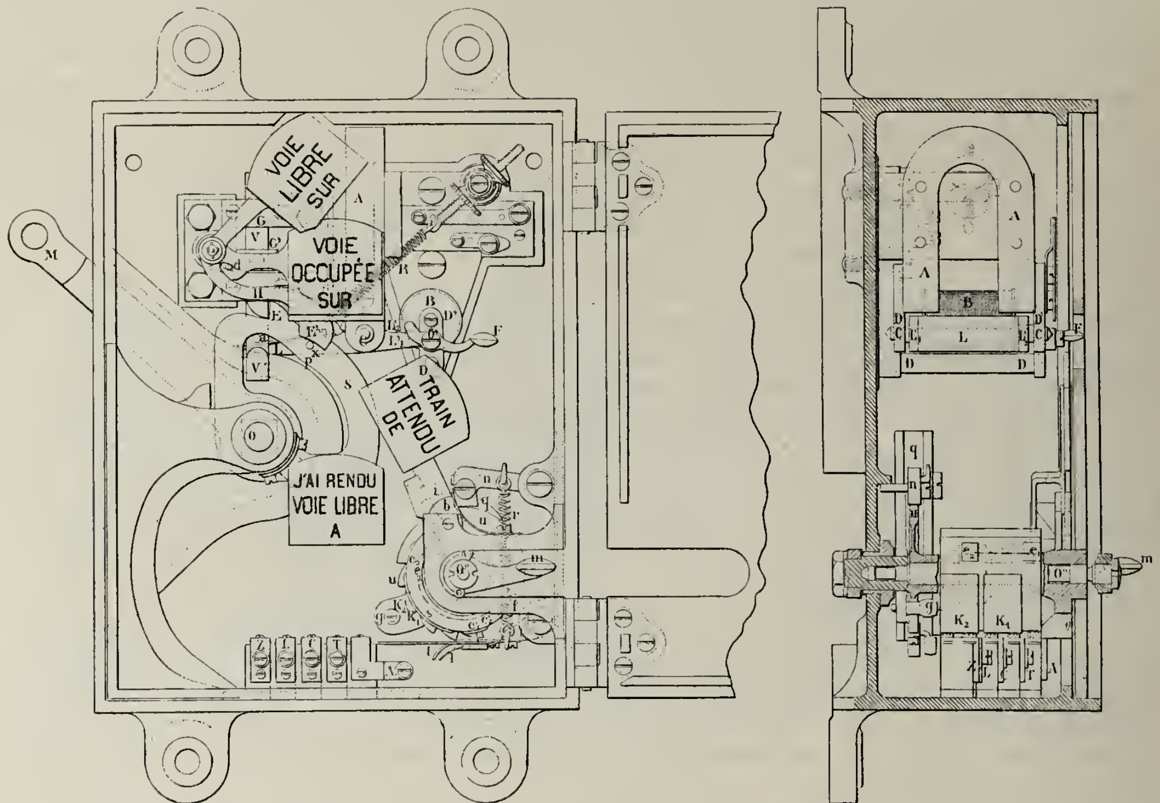



Fig. 2. — Appareil de block-système, modèle 1899.

Lorsque la manivelle M est relevée pour mettre le sémaphore à l'arrêt, le verrou VV′, n'étant plus maintenu relevé par le goujon $a$, vient par son propre poids s'appuyer sur le contour extérieur du secteur S et tombe dans l'encoche E, dès que celle-ci se présente.

Le bras sémaphorique mis à l'arrêt se trouve donc enclenché dans cette position, jusqu'à ce qu'un courant négatif soit de nouveau envoyé dans la bobine B, c'est-à-dire jusqu'à ce que C rende voie libre à B.

*Condition* 2. — L'appareil qui permet de rendre voie libre au poste précédent se compose d'une petite manivelle $m$, solidaire d'un secteur $s$ recouvert d'une plaque d'ébonite, sur laquelle sont montées en saillie six lames d'argent $e_1$, $e_2$, $e'_1$, $e'_2$, $K_1$, $K_2$, susceptibles d'établir des contacts entre les cinq ressorts Z, C, L, T, A, montés sur un bloc d'ébonite fixé sur le fond de la boîte.

Lorsque la manivelle $m$ est dans sa position normale, comme l'indique le dessin, les plaques $e'_1$ et $e'_2$ mettent en contact les ressorts L et A, c'est-à-dire la ligne et la bobine de l'appareil de block.

Un ressort de barillet, enroulé sur l'axe O″ de la manivelle de voie libre, tend à faire tourner de droite à gauche cette manivelle et le secteur *s*, qui en est solidaire ; mais ce mouvement ne peut se produire que lorsque le cliquet *t* dégage les dents du plateau *uu* fixé sur le secteur.

Si l'on met le bras sémaphorique à voie libre, la manivelle M actionne, par l'intermédiaire d'une petite bielle placée derrière l'appareil, une pièce *q*, qui est munie d'un doigt isolé *g*. Ce doigt *g*, dans son mouvement de rotation autour de l'arbre O″, vient soulever le cliquet *t* et le secteur tourne de droite à gauche sous l'action du ressort du barillet.

Lorsque le secteur a terminé son mouvement de rotation, les ressorts L et A sont mis en contact par les plaques $e_1$ et $e_2$. Une came *n* pénètre dans l'encoche *f* du plateau *uu* et empêche ainsi de ramener la manivelle *m* et le secteur *s* de gauche à droite.

En même temps, le doigt *g* soulève le cliquet *t* ; il appuie sur le talon *l* du ressort Z et isole celui-ci de manière à empêcher toute émission de courant sur la ligne dans le mouvement de droite à gauche du secteur *s*.

Tant que le bras sémaphorique reste à voie libre, c'est-à-dire tant que la manivelle M est abaissée, la manivelle *m* est immobilisée et on ne peut pas rendre voie libre.

Lorsque le bras sémaphorique est remis à l'arrêt, la manivelle M est relevée, la pièce *q* tourne de gauche à droite autour de l'axe O″, soulève, par un plan incliné *i*, la came *n*, et l'encoche *f* est dégagée. On peut alors faire tourner à la main, de gauche à droite, la manivelle *m* et le secteur *s*. Dans ce mouvement, le goujon *g* dégage le talon *l* du ressort Z, la plaque K réunit les ressorts Z et L et la plaque $K_1$ les ressorts C et T ; c'est-à-dire que le courant négatif est envoyé sur la ligne pour libérer l'appareil du poste précédent et le courant positif est mis à la terre.

*Condition* 3. — Lorsque la manivelle *m* est ramenée à fond de course, le cliquet *t* empêche le secteur de revenir en arrière et l'immobilise dans cette position jusqu'à ce que le cliquet soit de nouveau soulevé par la manœuvre de la mise à voie libre du sémaphore de cantonnement.

La came *n* et le cliquet qui immobilisent *m* et *n* dans leurs positions extrêmes sont rendus solidaires l'un de l'autre par le ressort en boudin *r*.

Lorsque le bras sémaphorique a été manœuvré, pour que l'on ne puisse pas rendre voie libre plusieurs fois, en imprimant à la manivelle *m* des mouvements de va-et-vient avant de l'amener à fond de course, le plateau *uu* est muni d'un crochet dans les dents duquel pénètre le cliquet *t*.

Block-système automatique Hall. — Nous dirons ici quelques mots de ce système automatique que la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée a mis en essai, entre Laroche et Cravant, sur une longueur de 40 km environ.

Dans ce système, c'est la présence même d'un train sur les rails d'une section qui maintient à l'arrêt les signaux donnant accès dans cette section, puis les débloque lorsqu'il passe dans la section suivante. Ces signaux sont d'ailleurs combinés avec des verrous électriques placés aux aiguilles, de façon que ces aiguilles puissent être manœuvrées seulement lorsque les signaux sont à l'arrêt et que, réciproquement, pendant leur manœuvre, elles bloquent ceux-ci à la position d'arrêt.

Le fonctionnement du block Hall repose sur l'emploi de courants électriques circulant dans les rails de la voie, principe d'ailleurs appliqué à d'autres blocks automatiques, généralement d'origine américaine.

Un circuit de voie se compose des deux files de rails, isolées à chaque extrémité par des éclisses spéciales isolantes A, A en bois (*fig.* 3) ou à fourrures de carton, et dont chaque rail est relié au rail voisin par des fils métalliques B, B.

Si l'on établit de la façon indiquée figure 3, à une extrémité de la section, une pile P, et à l'autre un électro-aimant R, celui-ci est normalement parcouru par le courant de la pile et maintient attirée son armature formant relais ; ce relais ferme une pile locale $P_1$ sur le circuit d'un moteur M, dont un frein magnétique maintient alors à voie libre le sémaphore S. Mais qu'un train vienne à franchir le signal S, chaque essieu T met en court-circuit la pile P, R abandonne

son armature et le courant de $P_1$ est coupé dans M, qui laisse le signal tomber à l'arrêt par l'effet d'un contrepoids ; le courant de P ne peut être rétabli dans R et le sémaphore ne peut s'effacer de nouveau que lorsque le dernier essieu a quitté la section AA'. Le train reste donc couvert par S tant qu'il se trouve entre A et A', et ce n'est qu'en pénétrant dans la section suivante, où il se couvre pareillement, qu'il ouvre la section précédente.

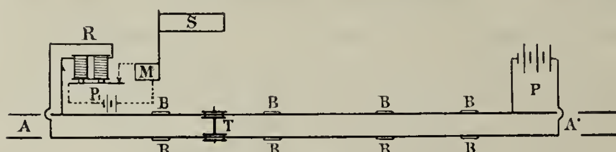



Fig. 3. — Block-système Hall.

Si une voie de manœuvre ou de garage aboutit dans la section, il faut empêcher deux trains de se prendre en écharpe à l'aiguille. A cet effet, on dispose les circuits comme l'indique la figure 4, avec des commutateurs C et C' et des isolements aux entretoises V des aiguilles. On voit alors que, si l'aiguille est disposée pour la voie principale, le courant de P arrive en R par la voie M et le commutateur C et revient par la voie N ; par suite, le signal reste effacé. Mais, si l'aiguille est faite pour la voie accessoire, le circuit est coupé en C, et, de plus, si l'éclisse l n'était pas suffisamment isolante, la pile serait mise en court-circuit par N, C' et la voie M. De même, si un train garé engage en T la zone dangereuse en dehors du garage franc, quand même l'aiguille serait faite pour la voie principale, la pile P est mise en court-circuit par MC*d*TN et toujours le sémaphore S est maintenu à l'arrêt.

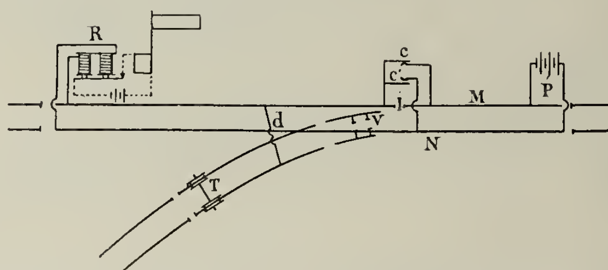



Fig. 4. — Block-système Hall. — Dispositif pour voie de garage.

Pour mettre sous la main du chef de gare la commande des signaux et des aiguilles, la gare possède un tableau, muni d'indicateurs et d'interrupteurs, auquel viennent aboutir le circuit, les signaux et les circuits de verrous électriques enclenchant les aiguilles à leur position normale.

Ce tableau, représenté figure 5, porte en haut les deux relais, dits de ligne, qui permettent le régime de la voie normalement fermée, tandis que, si on se bornait aux dispositions précédemment indiquées, chaque section serait ouverte normalement dès qu'elle ne serait plus occupée par un train ; on aperçoit ensuite les voyants qui marquent l'état libre ou occupé des deux voies en amont et en aval. Au-dessous sont des interrupteurs susceptibles de fixer à l'arrêt les signaux précédant la gare, disque et sémaphore d'entrée, ou bien, avec ces deux premiers, le sémaphore de sortie ou de cantonnement. Les boîtes intercalées portent des clés commutatrices qui ne peuvent être retirées qu'en mettant à l'arrêt les signaux de la voie 1 ou de la voie 2, ou des voies 1 et 2 ; ces clés sont nécessaires pour aller sur place déverrouiller les aiguilles correspondantes ; on est donc bien sûr, avant de manœuvrer ces aiguilles, que les manœuvres exécutées sur elles sont protégées par les signaux. Mais, la nuit, si le service est interrompu à la gare, il faut cependant qu'un train puisse se garer ou manœuvrer. A cet effet, le soir, la clé de la boîte 1-2 est introduite dans la boîte portant l'indication automatique et alors tout conducteur de train, muni

d'une clé 1-2, peut déverrouiller sur place les aiguilles, en mettant du même coup les signaux à l'arrêt, mais sans avoir besoin de recourir au tableau de la gare. Par réciprocité, tant qu'une clé 1 ou 2 ou 1-2 est emprisonnée dans la boîte commutatrice d'une aiguille, les signaux correspondants ne peuvent être remis à voie libre. On conçoit facilement comment ces effets peuvent se produire, en considérant qu'un courant permanent est nécessaire, soit pour maintenir à voie libre les signaux, soit pour déverrouiller une aiguille, et, d'après le montage du tableau ou des boîtes commutatrices, lorsque l'on établit le courant sur l'un des circuits, on l'interrompt dans l'autre ; donc toujours ou les signaux seront à l'arrêt ou les aiguilles verrouillées.

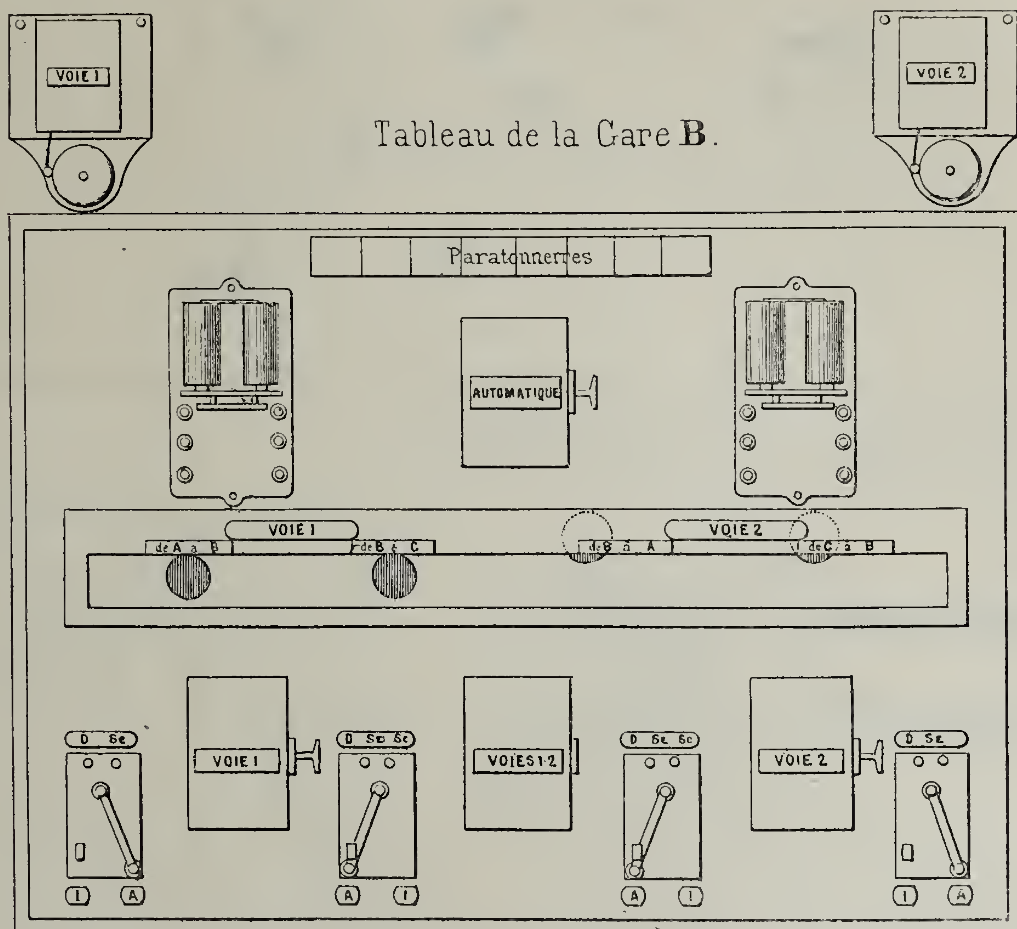



FIG. 5. — Tableau de gare pour block-système Hall.

Les moteurs des signaux sont de petites dynamos auxquelles le courant est fourni par des piles de grand débit à la potasse et à l'oxyde de cuivre. Le courant actionne la dynamo pour la mise à voie libre du signal, puis, à la fin du mouvement, passe de la dynamo à un frein magnétique qui maintient le signal à voie libre. C'est lorsque l'on interrompt ce courant que le frein, cessant d'agir, abandonne le signal, qui tombe à l'arrêt par l'effet d'un contrepoids.

Les circuits de voie sont alimentés par des piles au sulfate de cuivre de grand volume et trois éléments suffisent pour une longueur de 1 000 à 1 500 m de voie.

Nous avons parlé d'un seul sémaphore ; dans la réalité, chaque gare possède pour chaque sens trois signaux : un disque avancé, un sémaphore d'entrée et un sémaphore de sortie ou de cantonnement ; tous trois se mettent simultanément à voie libre dès qu'un train quitte la section précédente, puis tombent à l'arrêt successivement dès que le train les a franchis. Les signaux

qui fermaient l'entrée de la section précédente sont débloqués lorsque le train a passé le sémaphore d'entrée du poste suivant. On voit ainsi que, dans sa marche, un train est protégé en pleine voie par les trois signaux du poste précédent et, dans une gare, par le disque et le sémaphore d'entrée. D'autre part, les manœuvres sont couvertes par les deux mêmes signaux.

**Appareils de block-système de la Compagnie du Nord.** — Les appareils en usage sont les électro-sémaphores du système Tesse, Lartigue et Prudhomme avec certaines modifications destinées :

Fig. 6. — Enclenchement conditionnel pour bifurcation.

1° A assurer la dépendance des sections successives de block par l'enclenchement des grandes ailes avec les petits bras dans la même direction ;

2° A enclencher le disque à distance avec la grande aile ;

3° A détruire la dépendance des sections encadrant une station, lorsqu'un train quitte la voie principale sans continuer immédiatement sa route.

Toutes ces modifications subsistaient en 1889 et nous n'y reviendrons pas.

Nous allons décrire sommairement les perfectionnements récents apportés aux électro-sémaphores dans la période de 1889 à 1900.

Enclenchements conditionnels. — *Passage d'un train à une bifurcation.* — Aux abords d'une bifurcation munie du block-système, lorsqu'un train vient du tronc commun M pour se diriger vers O (*fig.* 6), il est nécessaire non seulement de ne pouvoir débloquer en arrière avant d'avoir couvert le train à son passage, mais encore de ne pouvoir bloquer que dans la direction réellement suivie par le train.

Fig. 7. — Commutateur à quatre plots du block-système de la Compagnie du Nord.

Cette dernière condition implique donc l'obligation de ne pouvoir lancer le courant de désolidarisation par la mise à l'arrêt de chaque grande aile que si les aiguilles donnent bien la direction couverte par chacune de ces grandes ailes.

Inversement, pour un train allant de O vers M, on ne doit pouvoir débloquer en arrière qu'au poste situé sur la branche d'où provient le train ; cette condition est réalisée en intéressant à la fermeture du circuit de désolidarisation les positions d'aiguilles et de signaux donnant la direction correspondante.

En pratique, pour que les courants de désolidarisation ne passent que pendant le très faible temps nécessaire à leur action, les leviers d'aiguille préparent d'abord le circuit, qui n'est complètement fermé que par un contact électrique très court pendant la fermeture du signal d'arrêt correspondant.

On emploie à cet effet deux commutateurs :

L'un, dit à quatre plots (*fig.* 7), s'installe sur le levier intéressé ou sur la transmission qui en dépend ; il ferme alternativement un circuit dans telle ou telle direction suivant la position du levier.

L'autre, pour les enclenchements entre sémaphores et signaux d'arrêt, sert en même temps pour le contrôle de la position du signal (*fig.* 8) ; le contact *d* est relié à l'appareil de contrôle et le contact *c* à l'appareil d'enclenchement numéro 2 du sémaphore ; sur ces deux contacts glissent deux ressorts *r* et R en communication avec la terre. Le petit ressort *r* frotte seul sur le contact de contrôle *c* ; quant au ressort R, il ne frotte sur le contact *d*, relié à l'appareil d'enclenchement, que pendant l'instant très court du temps de la fermeture du signal carré ; pendant l'ouverture, il est écarté de ce contact par le petit plan incliné *p* et passe par-dessus lui, et ainsi de suite.

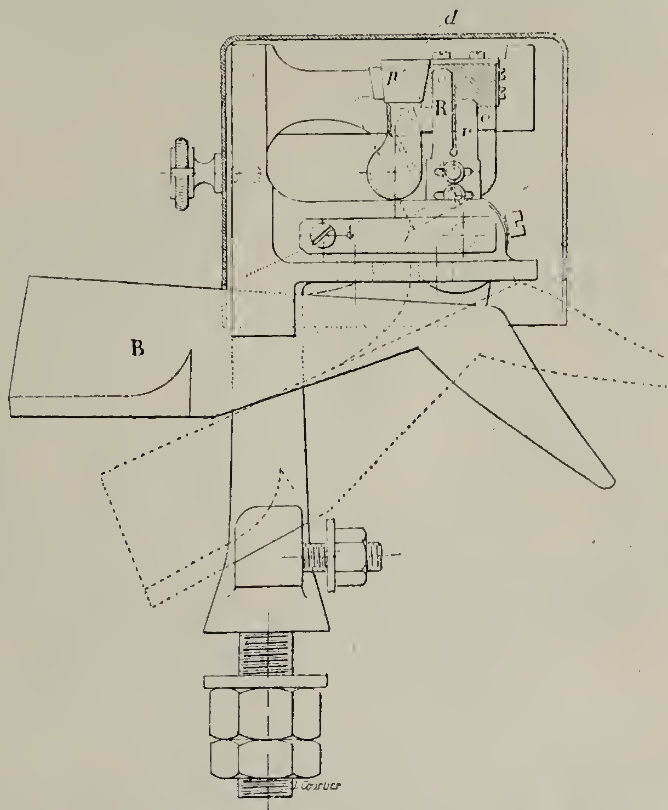



Fig. 8. — Commutateur d'enclenchement du block-système de la Compagnie du Nord.

Pénétration des trains dans les sections bloquées. Appareils mémento. — *Type à jetons.* — Lorsqu'un train pénètre en section bloquée, l'autorisation n'est donnée que sur la remise d'un ordre écrit au mécanicien. Or il en résulte nécessairement que le garde-sémaphore doit compter le nombre des trains entrés en section bloquée, afin de remettre la grande aile du sémaphore à l'arrêt aussitôt après le débloquage, et cela autant de fois qu'il y a de trains entrés en section bloquée.

L'appareil mémento de pénétration a été établi dans le but de faciliter au garde-sémaphore le comptage des trains qui pénètrent successivement dans une section bloquée et de lui rappeler l'obligation de remettre la grande aile à l'arrêt; après sa mise à voie libre par le poste suivant, autant de fois qu'il a pénétré de trains dans la section bloquée. L'appareil présente, en outre, l'avantage d'intéresser les agents des trains à ce comptage ; c'est en effet le mécanicien qui, sur la demande du conducteur chef du train, remet à celui-ci un de ces jetons, en échange d'un bulletin dit de pénétration, et c'est le conducteur qui introduit lui-même ce jeton dans l'appareil.

Cet appareil se compose d'une boîte en fonte divisée en deux compartiments ; le premier, ABCD (*fig.* 9 et 10), est accessible sur le côté par une porte spéciale et il communique par une goulotte N avec l'ouverture rectangulaire O ménagée sur le devant de l'appareil.

Le second compartiment est accessible, sur la face, par une porte X (*fig.* 11), sur laquelle

est fixé un électro-aimant R, dont l'armature V, montée sur pivot à l'une de ses extrémités, est terminée à l'autre extrémité par une ancre destinée à laisser passer une à une les dents $a, a, a, a$, d'un échappement solidaire d'un disque en laiton K.

Le disque est divisé en sept parties égales, de 1 à 6 et une croix ; il est constamment sollicité en arrière par un ressort. Un isolant en ivoire $v$, dans la position de la croix, permet d'isoler entre eux deux ressorts de contact et d'interrompre ainsi le circuit d'une pile locale.

A l'aide d'une tige H, portant un cliquet à ressort $x$, on peut faire avancer le disque d'une division chaque fois que l'on tire sur le bouton. En même temps cette tige appuie, à fin de course, sur un levier mobile J terminé par un écran M qui dégage l'ouverture O par laquelle on introduit les jetons.

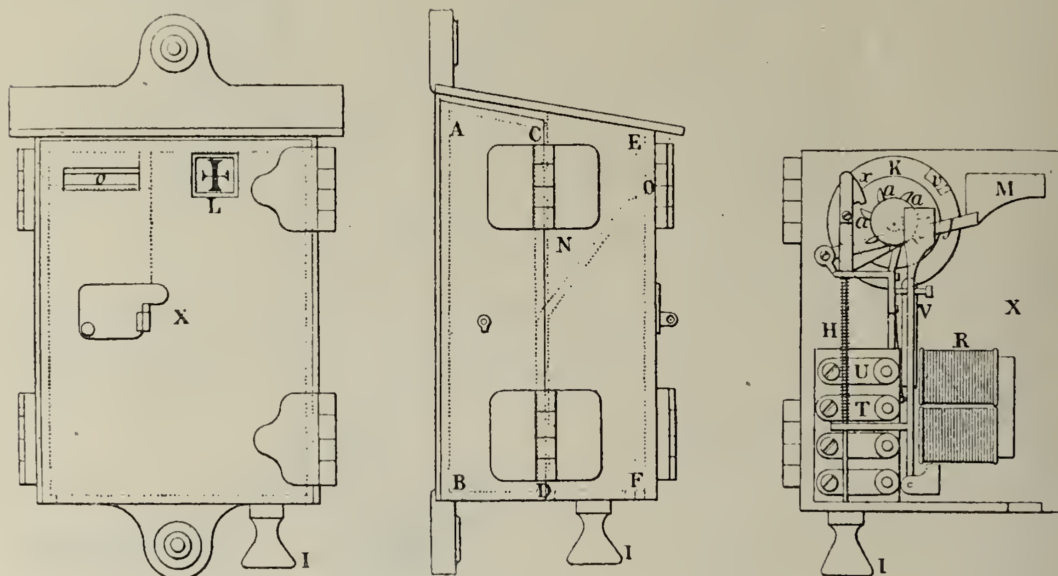



Fig. 9, 10 et 11. — Appareils mémento de la Compagnie du Nord.

L'introduction d'un jeton oblige à agir sur la tige de tirage H pour découvrir l'ouverture O ; par cette manœuvre, on fait avancer l'échappement d'une dent et, par suite, d'une division le disque K qui, au lieu de la croix, présente devant l'ouverture vitrée L le numéro 1. Il s'établit alors un courant local qui fait tinter une sonnerie.

Le retour en arrière et par numéro s'obtient par la mise à l'arrêt de la grande aile du sémaphore, autant de fois qu'il est nécessaire. A cet effet, l'appareil est intercalé (*fig.* 12) sur l'appareil d'enclenchement numéro 2, de telle façon que le courant électrique produit par la manœuvre de la grande aile enclenche le disque et actionne en même temps l'électro-aimant de l'appareil « mémento ».

*Type sans jetons.* — Dans certains cas, il n'est pas possible au conducteur d'accéder facilement et rapidement au poste de block pour y apporter le jeton de pénétration. Aussi la Compagnie du Nord a-t-elle transformé l'appareil mémento de manière à laisser la grande aile à l'arrêt tout le temps que la section qu'elle couvre est effectivement occupée et à suppléer au transport d'un jeton, tout en conservant le comptage mécanique des trains.

Au lieu de procéder à autant de blocages et de déblocages successifs, à l'aide des appareils numéro 1 et numéro 2 en correspondance, qu'il entre de trains dans la section bloquée, on suspend la manœuvre effective de ces appareils tant qu'il y a un train dans la section et on y substitue, durant cette période, la manœuvre de deux appareils spéciaux 1 *bis* et 2 *bis* enclenchés respectivement avec les appareils 1 et 2, qu'ils remplacent temporairement.

Lorsqu'un train pénètre dans la section bloquée, la manœuvre de l'appareil 1 *bis* a pour

effet de désolidariser les appareils ordinaires du poste, comme si le train était couvert effectivement, et de faire passer au nombre suivant le nombre indiqué sur les enregistreurs des deux postes.

Le poste de sortie, par la manœuvre de son appareil numéro 2 *bis*, fait décompter les compteurs, unité par unité, à la condition de libérer l'appareil numéro 2 *bis* lui-même, avant chaque manœuvre, par la mise à l'arrêt de la grande aile de ce poste ou une désolidarisation extérieure.

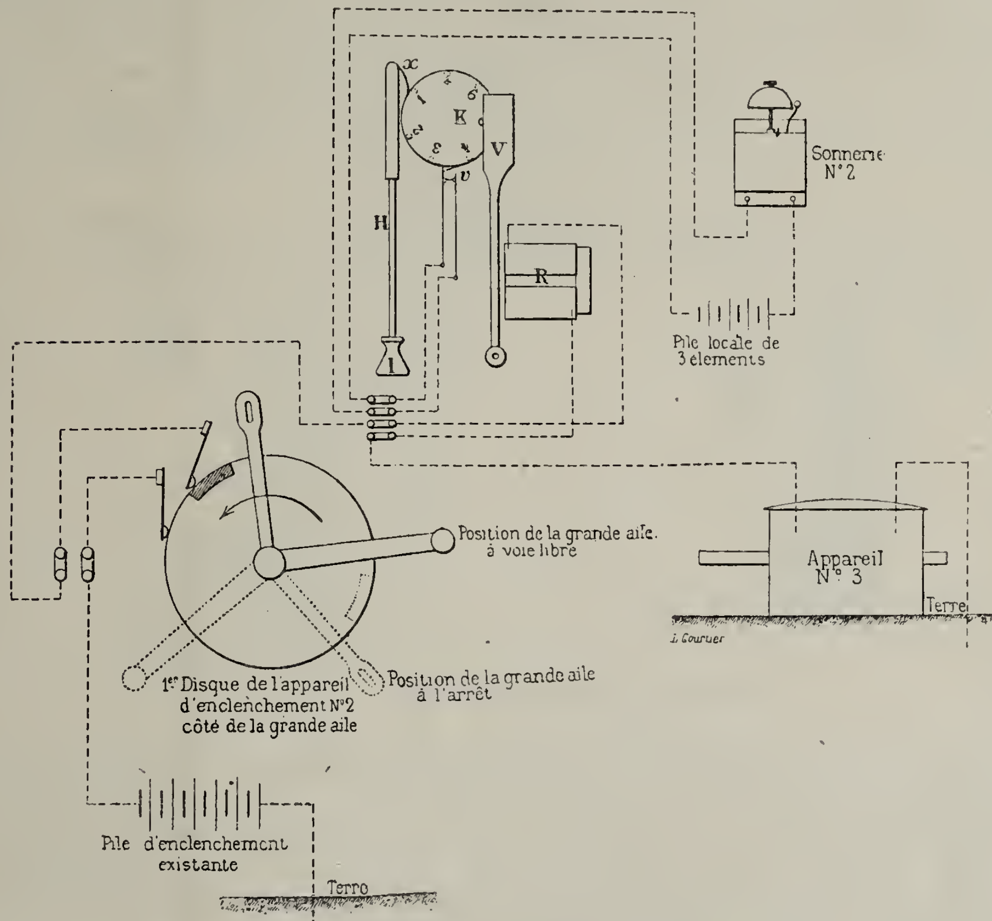



Fig. 12. — Connexions de l'appareil mémento de la Compagnie du Nord.

Enfin, le garde du poste de sortie ne peut faire tomber la grande aile du poste d'entrée par la manœuvre de l'appareil numéro 2 ordinaire que lorsque l'enregistreur 2 *bis* a désenclenché l'appareil numéro 2 en revenant au zéro et que le dernier des trains introduits a dégagé la section.

**Appareils de block-système des Chemins de fer de l'État.** — Trois systèmes de block fonctionnent actuellement sur les chemins de fer de l'État : 1° l'électro-sémaphore Lartigue ; 2° le block-système Flamache ; 3° le block-système Sarroste et Loppé.

Nous ne parlerons que de ce dernier, qui est spécial aux chemins de fer de l'État.

Block-système Sarroste et Loppé. — Cet appareil remplit le programme habituel avec l'adjonction d'une pédale. Ainsi le signal de cantonnement mis à l'arrêt s'enclenche automatiquement et ne peut être libéré que par le poste suivant ; ce second poste ne peut lui-même rendre voie libre au premier qu'après avoir mis à l'arrêt son propre signal et qu'après que le dernier train annoncé a rencontré une pédale placée sur la voie à proximité du poste.

Voici comment sont réalisées ces conditions :

Les leviers des signaux de cantonnement sont enclenchés par un verrou électrique qui sera décrit plus loin, avec commutateur K (*fig.* 13), et chaque poste comprend, comme appareils électriques, outre le verrou de signal et la pédale T, un commutateur à plateau circulaire, une sonnerie Jousselin J, une sonnerie trembleuse ordinaire et un microtéléphone.

Soient deux postes consécutifs I et II et un train sur voie 1 annoncé à I ; celui-ci demande à II le déclenchement par sonnerie Jousselin. A ce moment, les deux commutateurs $o_1$ et $o_2$ sont sur la position $o$M, « attente sur sonnerie », qui met en communication les frotteurs A et Z par la bande métallique *ab*. Si le poste I appuie sur un bouton B, le courant de la pile $P_1$ est envoyé sur la ligne jusqu'à la sonnerie $J_2$. Le poste II interpellé amène sa manivelle dans la position $oM_1$ (envoi de déclenchement), s'il le peut; or, pour qu'il le puisse, il faut que la saillie du plateau ait pu franchir le crochet de l'armature des bobines V; le circuit de celles-ci peut se

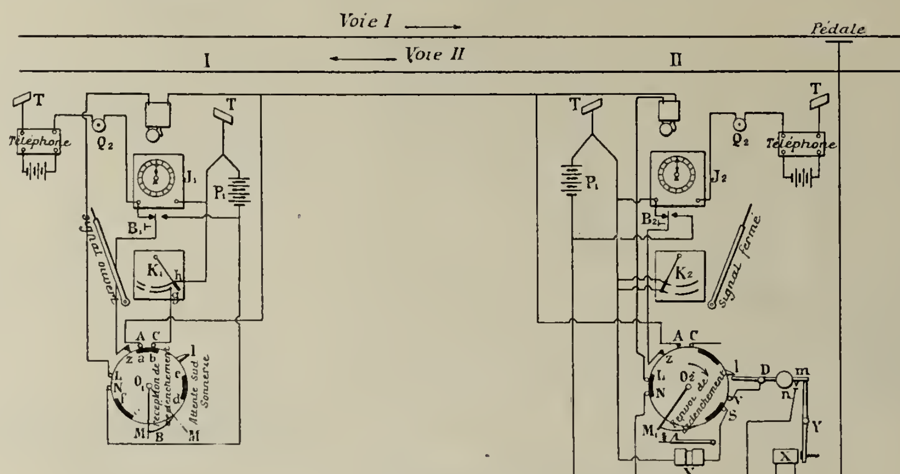



Fig. 13. — Block-système Sarroste et Loppé.

trouver coupé en trois endroits différents : au commutateur $K_2$ du levier du signal, aux frotteurs S et V du plateau, enfin aux contacts *m* et *n*. La continuité en K est établie lorsque le signal de cantonnement est à l'arrêt; les frotteurs S et V ont été reliés momentanément pendant le mouvement circulaire du plateau; enfin les contacts *m* et *n* se sont trouvés réunis lorsque le dernier train passant sur la pédale a excité la bobine X, qui, en attirant son armature Y, a laissé tomber le levier D. Lorsque le plateau continue son mouvement jusqu'à la position $o$M′ de la manivelle, le doigt *l* ramène le levier D à sa position horizontale. Dans cette position $o$M′, un courant permanent partant de $P_1$, au poste II, passe en NL, sonnerie trembleuse, ligne, puis au poste I, où il suit son commutateur sur la position $o$M, A, C, bandes *g* et *h*, actionne le verrou du levier $L_1$ et le libère. Le poste I, après avoir ouvert son signal, remet sa manivelle à la position $o$M (attente sur sonnerie) et le poste II en fait de même, ce qui arrête la sonnerie trembleuse.

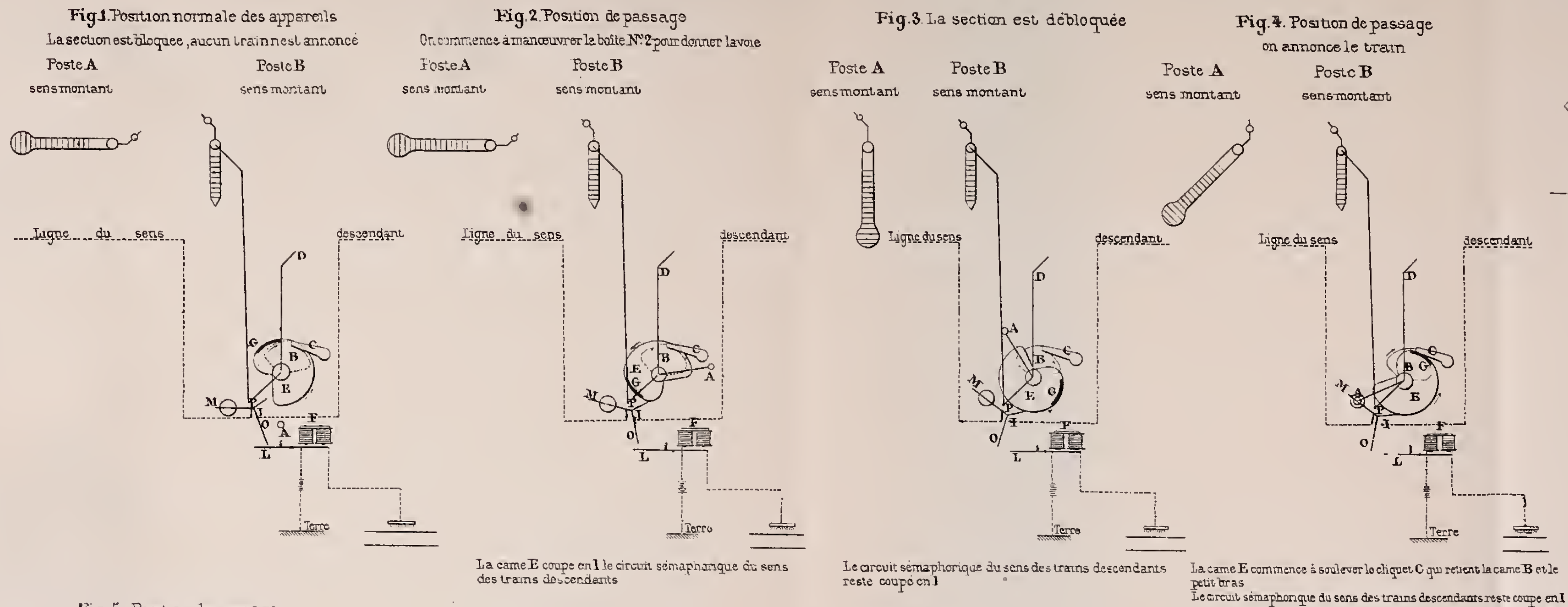
Lorsque les deux postes veulent causer entre eux, ils appuient réciproquement et successivement douze fois sur le bouton, ce qui amène les aiguilles des deux cadrans Jousselin à une position qui, par les petits commutateurs $Q_1$ et $Q_2$, met les téléphones sur le circuit de ligne.

Sémaphore automatique pour l'espacement des trains (système Sarroste). — Le réseau de l'État exposait un type de sémaphore destiné à séparer les trains se suivant sur la même voie par un intervalle de temps et non par un intervalle de distance, comme le fait le block-système. Cet appareil est relié à une pédale et disposé de telle façon que, lorsqu'un train passe sur la pédale, un déclenchement électrique met en action un moteur spécial placé dans une boîte métallique fixée au bâti du signal et qui a pour effet de mettre aussitôt à l'arrêt le bras

# COMPAGNIE DES CHEMINS DE FER DE L'EST

## BLOCK-SYSTEM DE VOIE UNIQUE

Fig. 1 à 8. — Schema indiquant les diverses positions des appareils en considérant la circulation d'un train montant.



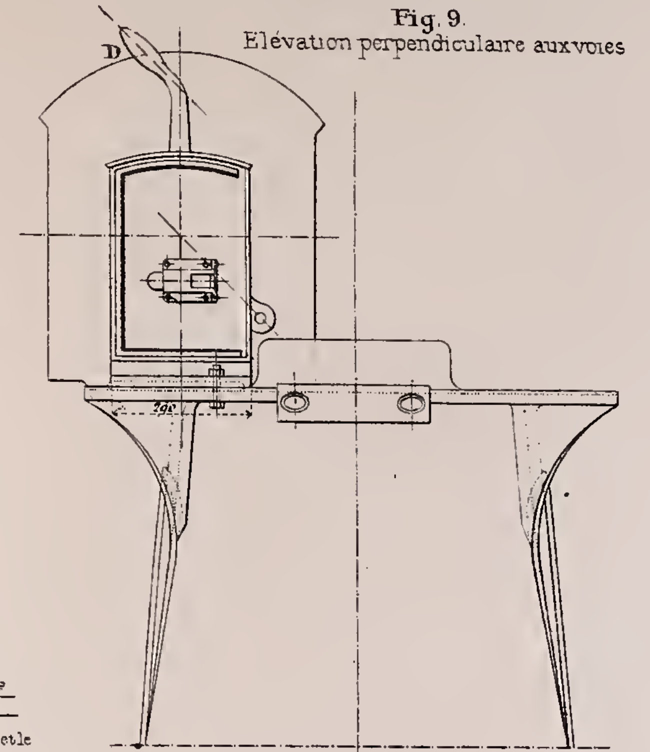

La came E coupe en I le circuit sémaphorique du sens des trains descendants

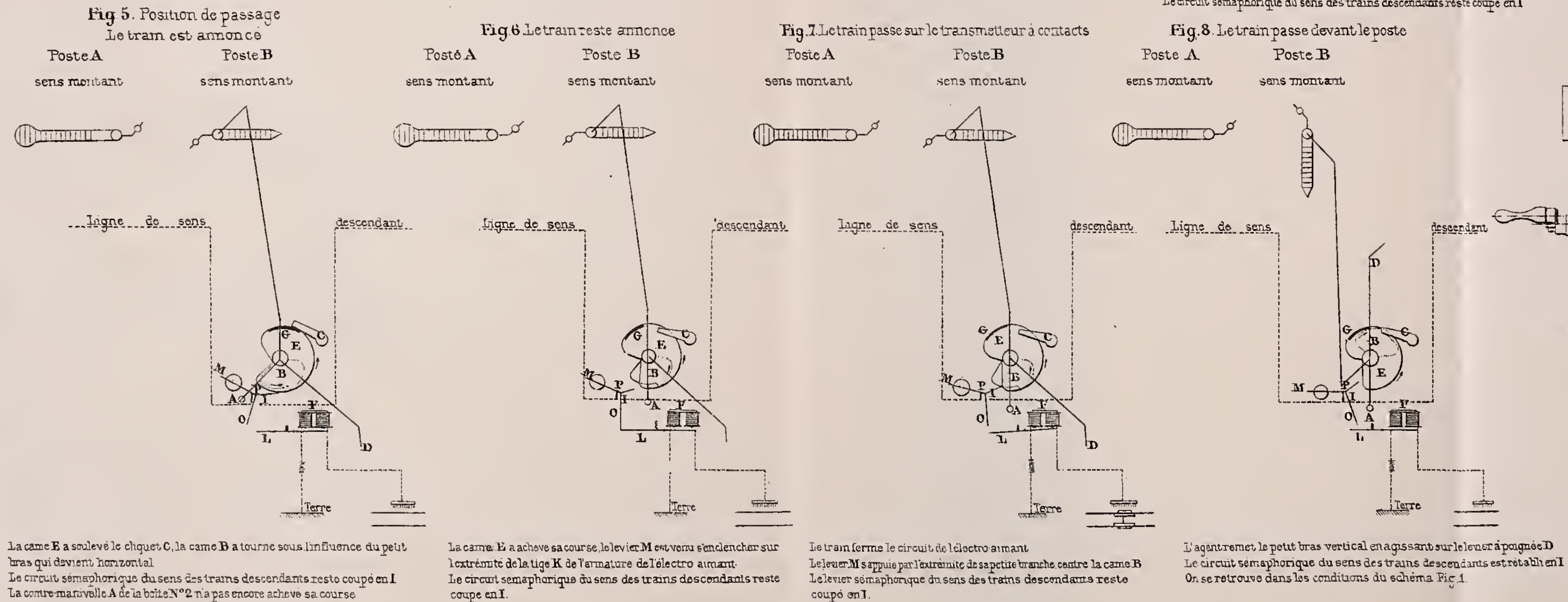
Le circuit sémaphorique du sens des trains descendants reste coupé en I

La came E commence à soulever le cliquet C qui retient la came B et le petit bras
Le circuit sémaphorique du sens des trains descendants reste coupe en I

Fig. 9 et 10.

Montage de la boîte de rupture du circuit sémaphorique



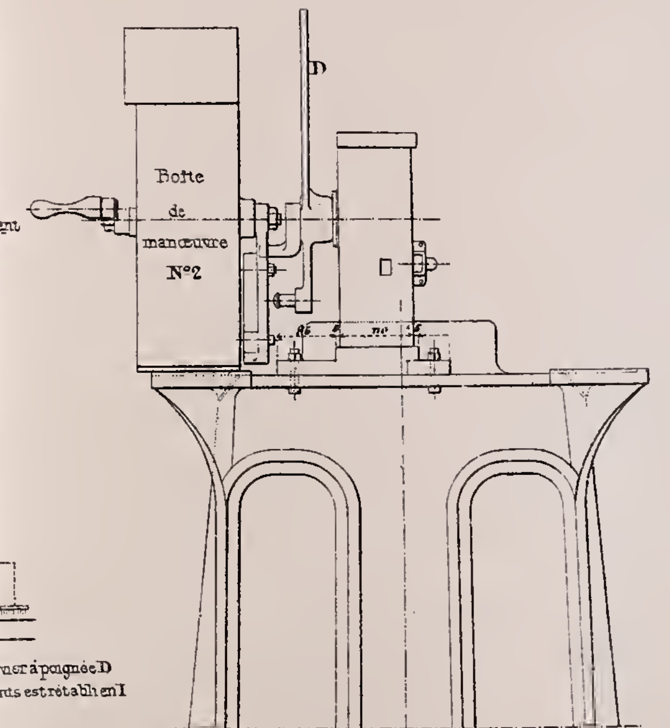




La came E a soulevé le cliquet C, la came B a tourne sous l'influence du petit bras qui devient horizontal
Le circuit sémaphorique du sens des trains descendants reste coupé en I
La contre-manivelle A de la boîte N°2 n'a pas encore achevé sa course

La came E a achevé sa course, le levier M est venu s'enclencher sur l'extrémité de la tige K de l'armature de l'électro aimant.
Le circuit semaphorique du sens des trains descendants reste coupe en I.

Le train ferme le circuit de l'électro-aimant
Le levier M s'appuie par l'extrémité de sa petite branche contre la came B
Le levier sémaphorique du sens des trains descendants reste coupé en I.

L'agent remet le petit bras vertical en agissant sur le levier à poignée D
Le circuit sémaphorique du sens des trains descendants est rétabli en I
On se retrouve dans les conditions du schéma Fig. 1.




Vve Ch. DUNOD — Éditeur, 49, quai des Grands-Augustins, Paris.
IMP. MONROCQ, 3, RUE SUGER, PARIS.

sémaphorique destiné à couvrir le train, puis à le remettre automatiquement à voie libre après un temps déterminé.

Le moteur est constitué par une sorte de mouvement d'horlogerie à poids et le compteur de temps est actionné par un ressort qui est remonté automatiquement à chaque manœuvre du sémaphore.

### B] APPAREILS DE PROTECTION POUR LIGNES A VOIE UNIQUE

**Block-système de la Compagnie de l'Est.** — La Compagnie de l'Est s'est proposé de réaliser un block-système de voie unique avec les électro-sémaphores Lartigue, qu'elle utilise sur les lignes à double voie.

Les sémaphores A et B (*fig.* 14) étant normalement à l'arrêt, il s'agissait, lorsque le sémaphore A avait été débloqué par l'agent du poste B, de ne rendre possible le déblocage du sémaphore B qu'autant que :

1° Le train avait passé sur une pédale C placée près du sémaphore B ;

2° L'agent du poste B avait abaissé le petit bras du sémaphore au moment où le train quittant la station A passait devant lui.

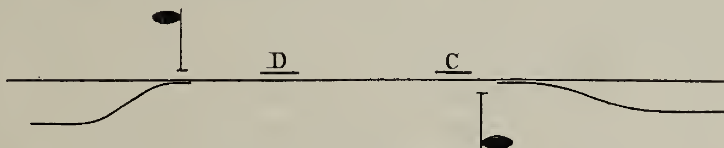



Fig. 14. — Principe de l'électro-sémaphore Lartigue.

Pour réaliser ce programme, on a ajouté au sémaphore B une boîte dite de rupture dans laquelle passe le fil de ligne reliant la grande aile du sémaphore B au petit bras du sémaphore A.

Les organes de cette boîte sont disposés de façon que la communication électrique qui, dans la situation normale, permet au poste A de débloquer le poste B, se trouve coupée précisément au moment où le poste B débloque le poste A en manœuvrant sa boîte numéro 2.

La coupure du circuit se fait mécaniquement pour éviter tout raté.

La fermeture du circuit s'obtient électriquement par le passage du train sur la pédale C, à la condition, toutefois, que l'agent du poste B abaisse le petit bras de son sémaphore au moment où le train venant de A passe devant lui.

La même disposition est appliquée au sémaphore A, le circuit étant rétabli par le passage du train sur la pédale D placée près du sémaphore A.

Le montage des appareils ainsi que le détail des opérations successives et le schéma des organes intérieurs des boîtes de rupture sont représentés sur la figure 15 (planche).

Il y a lieu de remarquer que, les coupures du circuit se faisant mécaniquement, il est matériellement impossible de laisser pénétrer dans une même section deux trains de sens contraire. Par contre, le rétablissement du circuit se faisant électriquement, on a dû chercher un moyen permettant de parer aux ratés de la pédale électrique. A cet effet, chaque sémaphoriste possède un certain nombre de billes en plomb qu'il peut introduire dans la boîte de rupture pour obtenir le même effet que le passage du train sur la pédale et, par suite, le rétablissement du circuit. Ces billes ne peuvent être retirées que par un agent spécial, ce qui établit un contrôle de l'emploi des billes par le sémaphoriste.

Le schéma de la planche se rapporte à deux sémaphores de tête situés l'un à l'entrée, l'autre à la sortie d'une section de voie unique comprise entre deux stations ; mais les mêmes appareils peuvent être utilisés pour les postes intermédiaires de pleine voie, de manière que l'on puisse, dans une même section, envoyer plusieurs trains successifs dans le même sens (impairs par exemple) et qu'il ne soit pas possible d'envoyer un train pair avant que le dernier des trains impairs soit sorti de la section.

**Block-système de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Les appareils appliqués par la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée pour assurer la sécurité des trains sur la voie unique sont, soit des appareils de block-système qui enclenchent les signaux dans des conditions déterminées, soit des cloches à forte sonnerie qui annoncent le départ du train à peu près dans toute la zone comprise entre les gares que doivent parcourir ces trains. Le premier système agit par les avis optiques que donnent les signaux de la voie, le second par des avertissements acoustiques.

Appareils de block-système (système Rodary). — Cet appareil, qui est le même que celui de la figure 1, comporte en plus les pièces représentées en pointillé. Il fait le distancement non seulement entre les trains qui se suivent dans le même sens, mais encore entre ceux qui vont en sens contraire.

Aux conditions 1, 2, 3, énoncées précédemment, il ajoute les deux suivantes :

4° Le poste B ne peut « rendre voie libre » à A qu'après avoir enclenché son sémaphore de sens BA ;

5° Lorsque B a « rendu voie libre » à A, il ne peut à son tour devenir « voie libre » qu'après avoir fait entrer et couvert le train expédié de A.

Voici comment ont été réalisées ces deux dernières conditions.

*Condition* 4. — Au poste B, le bouton P ne peut être pressé pour libérer le sémaphore de A et autoriser le départ d'un train venant de A en B que si le verrou M est retiré de l'encoche $z$ grâce au levier N redressé par la tige T poussée à fond, c'est-à-dire si le sémaphore de B, couvrant le sens BA, est fixé à l'arrêt.

Lorsque la règle T est tirée, au contraire, un ressort en boudin, caché sur la figure, tend à incliner le levier N et, par suite, à pousser le verrou M dans l'encoche $z$.

*Condition* 5. — En rendant voie libre au poste A, l'agent du poste B, appuyant sur le bouton P, fait descendre la pièce à glissière F par l'effort de l'équerre l. Dans ce mouvement, cette pièce F, par sa partie supérieure recourbée en équerre $f_1$, abaisse la queue S′ du taquet E′, et engage la goupille triangulaire $s'$, que celle-ci porte, sous la dent inférieure de l'ancre U ; donc, à ce moment, l'extrémité S′ de la pièce S′E′ reste abaissée et, par suite, l'autre extrémité E′ relevée. Le taquet E′ ainsi maintenu soulevé empêche le levier C′ de se détacher complètement de la bobine B′ (il pourra s'en détacher de 1 ou 2 mm) et, par suite, de relever le verrou V, quand même le poste A rendrait indûment voie libre à B.

Pour que le sémaphore sens BA du poste A se trouve effectivement libéré, il faut que la goupille $s'$ et, par suite, la queue S′ aient été dégagées par une double oscillation de l'ancre U, oscillation provoquée par un double mouvement de rotation du balancier Y rencontrant la saillie $u$ qui forme came. U, ayant repris sa position verticale par l'effet d'un ressort plat, S′ s'est relevé sous l'action d'un ressort en boudin et E′ ne cale plus C′.

Or le double mouvement de rotation nécessaire du balancier Y n'est produit que par la mise à voie libre, puis à l'arrêt du signal avancé pour l'admission en gare B et la couverture du train expédié du poste A.

La Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée avait 9 postes de ce genre entre Nice et Vintimille avant la transformation de cette ligne en double voie. Elle va appliquer les mêmes appareils en divers points de ses voies uniques.

**Appareils à cloche des chemins de fer de l'État.** — Le réseau de l'État emploie sur les plus importantes de ses voies uniques les signaux à cloche actionnés par des magnétos. Les dispositions plus spécialement à signaler sont les suivantes : usage de relais dans les gares qui interrompent leur service la nuit, adjonction dans les gares d'enregistreurs de signaux passés, application de cadrans indicateurs aux cloches de pleine voie.

Lorsqu'une gare se retire du service, elle introduit dans le circuit des cloches un relais (système Sarroste) qui, à chaque coup de cloche, est traversé par le courant émis de la gare qui annonce, et emprunte l'énergie d'une pile locale pour envoyer dans la section suivante le courant de cette pile et actionner ainsi les appareils.

L'enregistreur de gare (système Grégaré) consiste essentiellement en un mouvement d'horlogerie faisant dérouler une bande de papier, et en un style attiré par un électro-aimant et imprimant sur la bande le passage de chaque courant correspondant à un coup de cloche. Le déroulement de la bande est mis en train par la première émission de courant et s'arrête ensuite automatiquement; les indications marquées par le style sont recouvertes par une barre qui en assure l'inviolabilité et laisse cependant sur la bande une place libre pour l'inscription à la main de l'heure de l'enregistrement du signal et le numéro des trains annoncés, s'il y a lieu.

L'*indicateur* des cloches de pleine voie a pour but de laisser subsister la trace du signal reçu. Il consiste en une aiguille reliée par engrenages au cylindre moteur des cloches et qui, s'avançant à chaque émission sur un cadran, y indique la nature du signal transmis; elle est ensuite ramenée au zéro par les soins des gardes-barrières.

**Appareils de block-système de la Compagnie du Nord.** — Sur les lignes à voie unique, les appareils de block-système n'ont pas seulement pour but de maintenir, entre les trains qui se suivent, un intervalle suffisant; ils doivent, en même temps, interdire l'expédition simultanée des trains de sens contraire entre deux points consécutifs de croisement.

Les électro-sémaphores de simple voie fonctionnent à *voie normalement fermée*.

Lorsqu'un train se présente au poste A d'une section AB, dont la grande aile est normalement à l'arrêt, le garde doit, s'il n'y a pas de train engagé dans la section, ouvrir d'abord la voie au train survenant par l'abaissement de la grande aile, puis refermer la voie en remettant à l'arrêt la grande aile après que le train a pénétré dans la section, cette dernière manœuvre ayant pour résultat de couvrir le train et de l'annoncer au poste suivant.

Le garde du poste A ne peut faire pénétrer un train dans la section que si la situation des appareils du poste B le permet, c'est-à-dire si le petit bras de l'appareil numéro 2 du poste B a bien été précédemment abaissé par le garde, position qui correspond à l'absence de trains circulant dans le même sens dans la section.

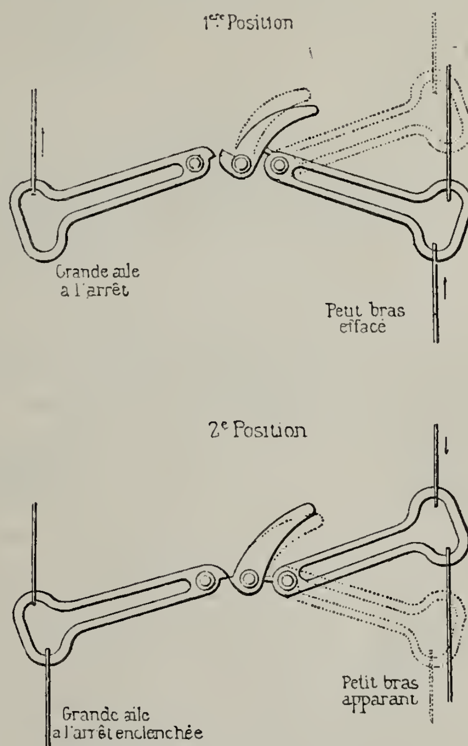



Fig. 16. — Poste terminus de la voie unique de la Compagnie du Nord.

Postes terminus de voie unique. — La circulation des trains étant ainsi réglée pour un seul sens, il devient évident que, pour empêcher, dans une section déterminée commandée par deux postes extrêmes, la circulation simultanée de deux trains de sens contraire, il faut et il suffit que l'annonce d'un train de A vers B, par exemple, par l'apparition du petit bras du poste B, enclenche à l'arrêt la grande aile commandant la circulation en sens opposé, c'est-à-dire la grande aile du poste B.

Cette condition a été réalisée mécaniquement, d'une manière simple : la tringle de manœuvre de la petite aile d'une direction, en passant de la position correspondant à l'horizontalité de l'aile à celle qui correspond à la position effacée, enclenche, sur la platine du carillon, la tringle de manœuvre de la grande aile correspondant à la direction opposée et l'immobilise absolument dans la position horizontale commandant l'arrêt, jusqu'à ce que, le train étant sorti de la section, le garde ait abaissé le petit bras et désenclenché ainsi la grande aile (*fig.* 16).

En outre, et comme surcroît de précautions, un interrupteur électrique spécial est articulé à la contre-manivelle de l'appareil numéro 1.

Cet interrupteur a pour mission de couper le circuit électrique de l'appareil numéro 2 pendant tout le temps que la grande aile du même poste est effacée.

On ne peut donc, en aucun cas, annoncer en même temps deux trains se présentant simultanément chacun à un bout de la section et il résulte, en définitive, de ces dispositions, qu'une section ne peut jamais être ouverte en même temps, car l'annonce d'un train dans un sens condamne immédiatement l'entrée de la section dans l'autre sens, à l'autre extrémité, en calant à l'arrêt un signal qui s'adresse aux mécaniciens.

D'autre part, à chaque boîte numéro 2 est articulé un *commutateur répétiteur interrupteur* qui émet, pendant le développement du petit bras, le même courant que celui qui résulterait de la manœuvre du commutateur à déclic de la boîte numéro 1 de la même direction, c'est-à-dire qu'en même temps que le petit bras du poste B, par exemple, se développe en produisant l'effacement de la grande aile du poste A précédent le petit bras du poste suivant C se développe aussi horizontalement et efface la grande aile de même direction du poste B, et ainsi de suite.

En 1895, la Compagnie du Nord a trouvé préférable de produire l'annonce des trains par l'apparition du petit bras aux différents postes d'une section de voie unique, non plus *de poste en poste* par le jeu automatique du commutateur répétiteur dont il vient d'être question, mais *simultanément*, par l'envoi d'un courant lancé du premier poste terminus par le garde, au moyen du commutateur à déclic, à tous les autres postes.

Les services électriques de la Compagnie ont été amenés, pour réaliser plus facilement la double condition que doivent remplir les appareils de fonctionner tantôt embrochés sur un même circuit en vue d'une annonce simultanée, tantôt reliés par des fractions distinctes de ce circuit, à installer un fil de ligne par direction pour actionner les petits bras et les grandes ailes, et un fil spécial pour actionner les accusés de réception dans les deux sens ainsi que les sonneries de correspondance, soit au total trois conducteurs électriques.

Accessoirement, afin de parer à l'éventualité d'une manœuvre intempestive du petit bras, soit par suite d'une distraction du garde, soit même par suite de malveillance de la part de personnes étrangères au service, un cliquet spécial placé dans la boîte numéro 2 maintient le petit bras de chaque poste dans la position horizontale et s'oppose, par suite, à la libre rotation de la manivelle de l'appareil jusqu'à ce que le garde, auquel cette opération donne le temps de la réflexion, ait dégagé le cliquet à l'aide d'une clé spéciale dont il est seul porteur.

Postes intermédiaires. — Entre les postes extrêmes, il peut exister un ou plusieurs postes intermédiaires, installés en des points où il n'existe ni voies de croisement ni voies d'évitement, et dont le rôle est d'augmenter la capacité de circulation de la ligne à voie unique.

Lorsqu'un train a quitté un point de croisement où existe un électro-sémaphore terminus, la voie doit rester fermée pour les trains de sens contraire jusqu'à ce que le train soit arrivé au point de croisement suivant; mais elle peut être rendue libre pour les trains de même sens dès que le premier train a atteint et franchi le premier poste intermédiaire.

Chaque électro-sémaphore intermédiaire du type étudié en 1892 par les services électriques du chemin de fer du Nord, comporte, en double, sur le même mât, les organes des sémaphores terminus précédemment décrits, à l'exclusion du commutateur articulé à la contre-manivelle de la boîte numéro 1, dont il a été question plus haut.

Les appareils électriques de manœuvre de 1892 ont subi les modifications suivantes :

A. *Poste terminus.* — Dans l'appareil numéro 1, le frotteur de *terre continue* du grand commutateur a été supprimé et remplacé par un commutateur spécial de terre manœuvré en même temps que le commutateur à déclic, auquel il est relié, ne donnant ainsi la terre qu'au moment opportun (*fig.* 17).

Le commutateur à déclic, lorsqu'on le manœuvre pour obtenir le déclenchement simultané de tous les petits bras, envoie le courant d'une forte pile dans le circuit de tous les appareils;

les bobines de l'électro-aimant Hughes, qui enclenche la grande aile, sont montées en dérivation, afin de diminuer la résistance totale du circuit des appareils de tous les postes.

Le garde, en tirant le commutateur à déclic, envoie un courant de très courte durée qui déclenche toutes les petites ailes ; mais il a soin de maintenir tiré ce commutateur pendant assez de temps pour que le commutateur de terre, manœuvré du même coup, permette au courant de retour qui doit déclencher la grande aile de son poste de produire son effet. Lorsque le garde lâche la manette du commutateur à déclic, après la chute de la grande aile de son poste, la terre du circuit des ailes se trouve de nouveau coupée, ce qui réalise une excellente défense contre les courants atmosphériques.

L'appareil numéro 2 ne diffère de l'ancien que par la suppression d'une connexion (*fig.* 18) et par le groupage en dérivation des bobines de l'électro Hughes, pour les mêmes raisons que précédemment.

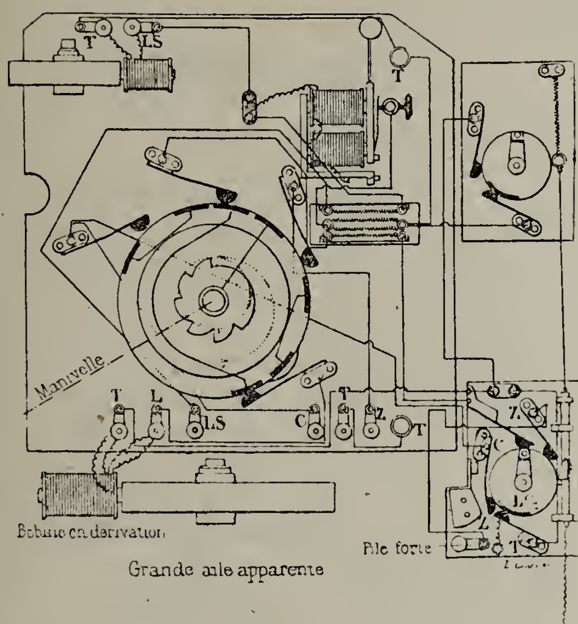



Fig. 17. — Commutateur spécial de terre des postes intermédiaires. — Appareil n° 1.

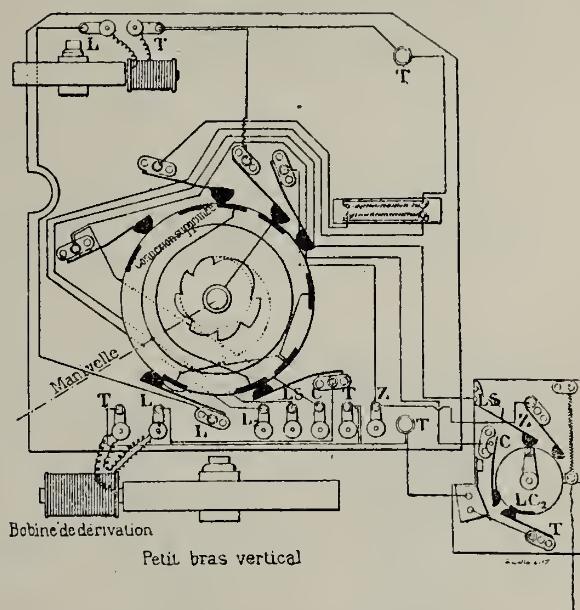



Fig. 18. — Commutateur spécial de terre des postes intermédiaires. — Appareil n° 2.

B. *Postes intermédiaires.* — L'appareil numéro 1 du poste intermédiaire ne diffère de l'appareil numéro 1 terminus précédent qu'en ce qu'il ne comporte pas le commutateur spécial de terre manœuvré en même temps que le commutateur spécial à déclic et qu'il est muni d'une terre spéciale en vue de la mise à la terre du cuivre de la pile, lors de l'annonce d'un train par le commutateur à déclic.

L'appareil numéro 2 ne diffère de l'appareil numéro 2 terminus que par les connexions aux piles du commutateur d'échange de sonneries qui fonctionnent à l'aide du pôle zinc aux terminus et à l'aide du pôle cuivre aux intermédiaires.

Appareil d'enclenchement. — Les appareils de poste intermédiaire, type 1895, comportent également un véritable enclenchement électro-mécanique des appareils numéros 1 et 2, analogue à celui des postes de double voie (*fig.* 19), et qui a pour but d'obliger le garde, dans le cas de la circulation de trains dans le même sens, à mettre la grande aile de son poste à l'arrêt avant de débloquer la position de section en arrière.

Appareils type 1900. — Dans le dernier système, on a eu pour principal objectif de n'obtenir la chute d'aucune grande aile de différents postes de la section sans l'autorisation directe du poste terminus de l'autre extrémité.

Pour faire pénétrer un train, le garde du poste terminus agit sur le commutateur à déclic

et, par cette manœuvre, déclenche le petit bras du premier poste suivant, qui, à son tour, déclenche celui du second poste et ainsi de suite, par cascade, jusqu'au poste terminus de l'autre extrémité.

Petit bras vertical — Grande aile à l'arrêt

Fig. 19. — Appareil d'enclenchement de poste intermédiaire.

Mais, contrairement à ce qui se passe dans le système de 1892, l'annonce produite à chaque poste intermédiaire ne fait pas déclencher en retour la grande aile du poste précédent. Seul, le dernier petit bras, celui du poste terminus de l'autre extrémité, est muni d'un commutateur spécial destiné, lorsque le petit bras se développe, à envoyer en retour un courant de sens voulu pour faire tomber d'abord la grande aile du poste précédent, puis successivement, par cascade, la grande aile de tous les postes, jusques et y compris celle du premier poste terminus.

Fig. 20. — Bâton-pilote électrique.

**Bâton-pilote électrique (système Webb Thompson) des chemins de fer de l'État.** — Cet appareil a pour but de ne permettre matériellement, par un bâton-pilote, l'accès qu'à un seul train d'une section de voie unique.

Fig. 21. — Détails du bâton-pilote électrique.

A cet effet, étant donnés deux postes consécutifs I et II, chacun de ces postes possède un certain nombre de bâtons d'une couleur spéciale à la section considérée (*fig.* 20), et tous ces bâtons G sont enfilés et enclenchés dans la rainure BD d'une colonne de fonte, de façon que, si l'un d'eux vient à être retiré en I, par exemple, pour être remis au mécanicien d'un train, tous les autres soient immobilisés, en I et en II, jusqu'au moment où le bâton sera réintégré dans l'appareil du poste II ; mais alors on pourra prendre un bâton, soit en I, pour envoyer un train de même sens que le précédent, soit en II, pour envoyer un train de sens contraire.

Ce résultat est obtenu grâce à la forme spéciale du bâton qui porte des cannelures circulaires L, M, N, O (*fig.* 21), ne lui permettant de sortir de la rainure que par une ouverture supérieure plus large F (*fig.* 20), et grâce aux enclenchements électriques contenus dans la

boîte G, arrêtant ou laissant passer, suivant le cas, le bâton lorsqu'on cherche à l'amener à l'ouverture F.

Lorsque le poste I veut expédier un train à II, il appuie sur la manette K et attend que II lui réponde par un coup de timbre ; à ce moment, les deux postes tournent la clé J de leur appareil et le poste II, agissant sur sa manette K, donne au poste I la faculté de retirer un bâton, en envoyant un courant dans un électro-aimant.

Celui-ci, attirant son armature, permet à un disque de tourner. Or ce disque présente quatre encoches, dont l'une se trouve toujours au droit de la rainure AD. Lorsqu'on a remonté un bâton, si le disque est immobilisé, ce bâton ne peut aller au delà ; mais, si le disque est libre, le bâton peut, en entraînant ce disque, s'engager dans la rainure circulaire E et arriver à l'ouverture F par laquelle il est retiré.

La manette K et la clé J ont pour rôle de manœuvrer des commutateurs qui sont au nombre de six, et leur combinaison avec diverses autres pièces ne produit ce résultat que lorsqu'un bâton est dehors ; on ne peut même demander la voie, car les deux fils de ligne cessent d'être reliés entre eux. Seule la remise du bâton dans l'appareil de l'un des deux postes rétablit les communications coupées.

Le jeu de ces combinaisons et enclenchements est trop compliqué pour être exposé ici tout au long ; nous nous sommes bornés à expliquer la manœuvre de l'appareil et la fonction des organes principaux.

Ce système est installé à titre d'essai sur la section de Joué-lès-Tours, au poste du Pont-du-Cher, près Tours.

### C] APPAREILS DE PROTECTION DE CERTAINS POINTS PARTICULIERS

**Appareils de passages à niveau de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Certains passages à niveau sont placés dans des conditions telles qu'il est utile de prévenir de l'approche des trains les agents chargés de la manœuvre des barrières. Il y a aussi intérêt à ne pas laisser trop longtemps fermées les barrières pour des trains qui ont du retard et que la disposition du terrain ne permet pas de voir arriver.

La Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée emploie à cet effet deux systèmes : les appareils en correspondance et les appareils automatiques.

1° Les appareils en correspondance dont il est fait usage sont basés sur le principe des appareils Tyer. Ils fonctionnent par inversion de courant et donnent les indications voulues par le mouvement d'une aiguille qui est attirée d'un côté ou de l'autre, suivant le sens du courant qui a été envoyé dans la bobine sur l'axe de laquelle elle est montée.

Les boutons-poussoirs du Tyer sont remplacés par des leviers qui, suivant leur position, envoient au poste correspondant un courant positif ou négatif suivant le cas, qui incline l'aiguille de ce dernier poste vers l'indication voulue.

On place un appareil récepteur au passage à niveau même et un appareil dit avertisseur en un point d'où l'on peut signaler l'arrivée des trains.

A chacun de ces appareils récepteurs ou avertisseurs est adjointe une sonnerie qui appelle l'attention des gardes sur les signaux échangés.

Avec ces deux appareils, le passage à niveau demande au poste avertisseur s'il peut ouvrir la barrière. Celui-ci répond, si le train n'est pas en vue : « Ouvrez. » Le garde ouvre et en avise télégraphiquement le poste avertisseur par le signal : « J'ouvre. »

Lorsque le train est en vue, l'avertisseur donne électriquement au passage à niveau l'ordre de fermer ; celui-ci répond : « Je ferme », et il tient la barrière fermée jusqu'à ce que ce train ait dépassé son poste.

2° Les appareils avertisseurs automatiques ont pour but d'avertir de l'arrivée des trains certains passages à niveau exceptionnellement fréquentés ou placés dans des conditions de visibilité défavorables.

Ils se composent d'une pédale coupe-circuit, appelée « pédale Sourot » (*fig.* 22), renfermée dans une boîte métallique. La pédale est fixée à l'intérieur de la voie et est actionnée par le boudin des roues des véhicules. Elle se place en amont du passage à niveau (à une distance de 1 500 à 1 800 m).

La pédale se compose d'un ressort en spirale ayant la forme d'un ressort de sonnette, qui est normalement en contact avec un plot en cuivre fixé sur un étrier relié au fil de ligne.

L'appareil fonctionne à courant continu; au passage d'un train ou d'une machine, le ressort est écarté et quitte le contact et il en résulte une interruption de courant et le tintement d'une sonnerie-avertisseur au passage à niveau.

A cet effet, à l'extérieur de la maison de garde se trouve un annonciateur dont le volet, maintenu par une armature normalement attirée par un électro-aimant, tombe quand le courant

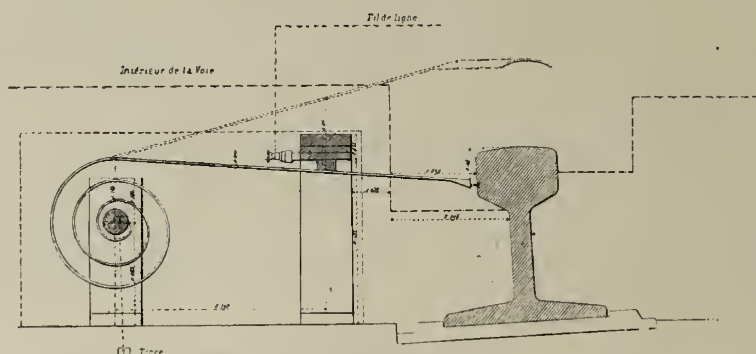



Fig. 22. — Pédale Sourot.

cesse et, en tombant, ferme le circuit d'une pile locale et fait tinter une sonnerie intercalée dans ce circuit jusqu'à ce que le garde-barrière ait relevé ce volet.

**Disque électrique système Rodary de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Sur certains points où des circonstances locales, éloignement du signal, interposition de tunnels, action de la neige et de la gelée, rendaient difficile et irrégulière la manœuvre des disques par les moyens mécaniques, on y a substitué la manœuvre électrique.

Le disque électrique comprend un disque ordinaire A (*fig.* 23) et un appareil moteur B déclenché électriquement, suivant le cas, par un commutateur C ou par une pédale D placée sur la voie.

Le disque tourne de 90° sous l'effort d'un câble en fil de fer T passant sur une poulie R fixée sur son axe, et qu'il met alternativement à la position d'arrêt et de voie libre.

L'appareil moteur (*fig.* 24), enfermé dans une boîte en tôle, comprend un tambour A enroulé d'une corde $T_2$ avec poids moteur P, et susceptible d'entraîner dans son mouvement de rotation le plateau B à profils spéciaux, puis deux leviers L et L′ qui, par l'intermédiaire de leurs galets *g* et *g′*, reçoivent du plateau un mouvement de va-et-vient; ce mouvement est ensuite communiqué au moyen du câble en fil de fer T à la poulie R.

Le mouvement est suspendu par la butée de l'une des cames D, $D_1$, $D_2$ sur la partie pleine *p* ou *p′* de l'axe partiellement évidé *o*; que celui-ci vienne à s'incliner en présentant son creux, le doigt D échappe et l'ensemble du tambour et du plateau se met à tourner; mais le manneton M vient bientôt buter sur le doigt *s* et soulever le contrepoids *z*; puis $M_1$ vient buter sur *s′* et soulever *h* et, par suite, le levier H s'abaisse et réenclenche tout le système dans la position indiquée par la figure.

En l'état de la figure, aucun courant ne passe dans l'électro-aimant E et la position correspondante du disque marque l'arrêt. Si un courant passe, l'armature F est attirée; la goupille 1 du levier H, sollicitée par un contrepoids en *h*, passe de la dent *f* à la dent *f′*; le doigt *e* de l'axe

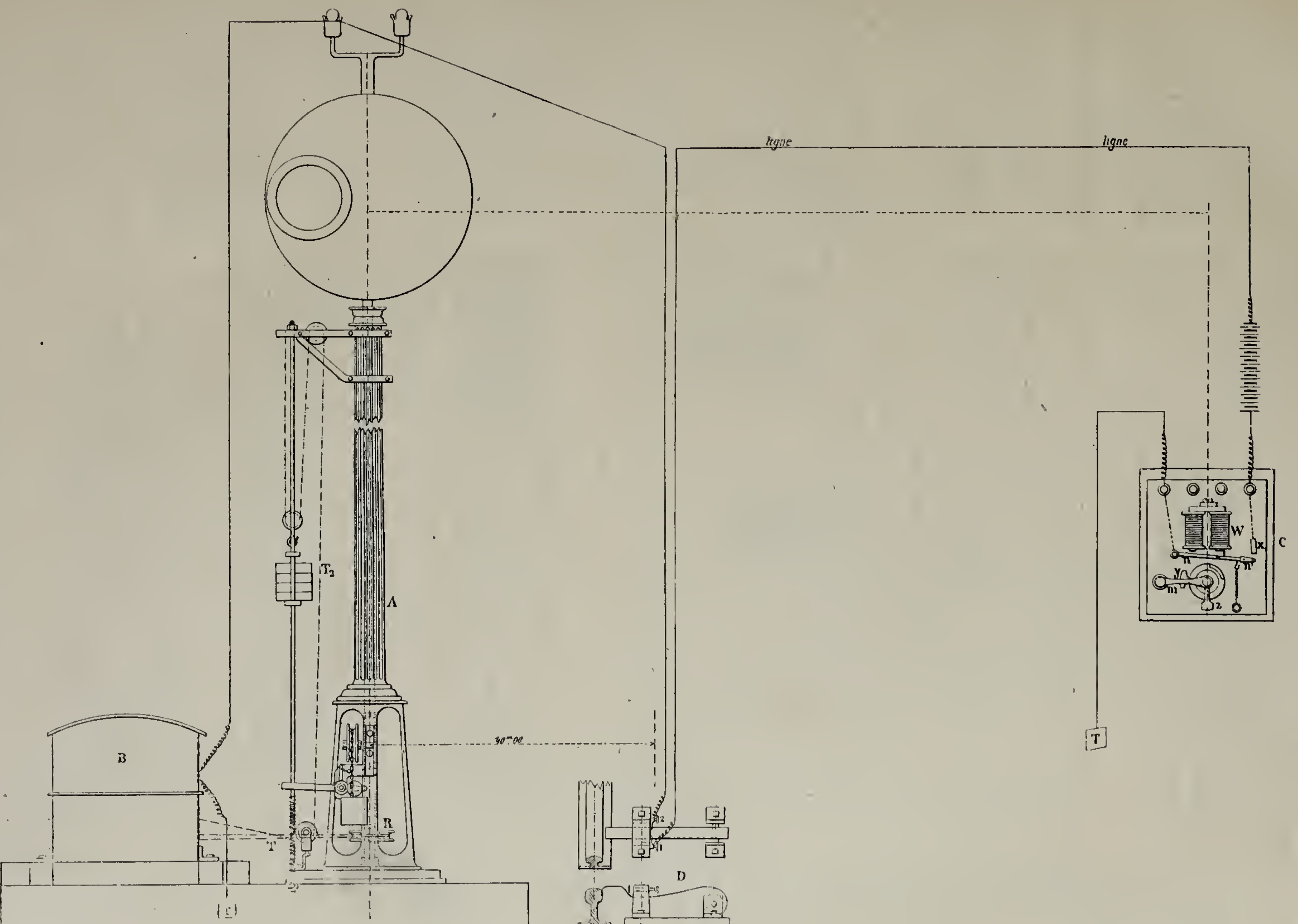



Fig. 23. — Disque électrique Rodary.

évidé $o$ vient sur le premier repos K, D échappe $p$ et le plateau entraîné par le poids moteur se met à tourner, le levier L vient vers la droite, L' vers la gauche, et le signal passe à voie libre. Alors, la came suivante $D_1$, qui n'est pas dans le même plan vertical que D, rencontre l'autre partie pleine $p'$ de $o$ et arrête de nouveau le mouvement. Lorsque le courant cesse de passer, la goupille I échappe la dent $f'$ sous l'action du contrepoids $h$, le doigt C passe du repos K au repos K', D échappe $p'$ et le plateau se met à tourner de nouveau ; le levier L revient vers la gauche, L' vers la droite et le disque se remet à l'arrêt ; l'action successive des mannetons M et $M_1$ réenclenche tout le système dans la position indiquée sur la figure, comme il vient d'être expliqué.

On voit ainsi que la position du signal est fixée à *voie libre* par la présence d'un courant électrique et à l'*arrêt* par l'absence de courant.

Donc une rupture du fil de ligne ou une faiblesse de pile ou toute autre cause affaiblissant ou supprimant le courant a pour conséquence la mise à l'arrêt du disque.

L'influence perturbatrice des courants atmosphériques ou de tout fonctionnement accidentel et anormal du signal est annulée par l'artifice des butées inégales $p$ et $p'$ de $o$, $k$ et $k'$ de K et les deux repos $f$ et $f'$ du levier H à des hauteurs différentes.

Prenons, par exemple, le cas du disque à l'arrêt représenté sur le dessin :

Qu'un courant atmosphérique ou un choc très violent vienne à faire osciller la fourchette F, la goupille I échappe $f$, mais aussi $f'$, puisque l'action perturbatrice momentanée n'a pu retenir indéfiniment l'armature F contre l'électro-aimant E. Donc, si D a pu échapper $p$, D échappera aussi $p'$, car le doigt $c$, n'ayant plus trouvé la butée $k$, est venu jusqu'en $k'$, repoussant $p'$ à sa position extrême vers la gauche. Au passage de D, le disque a bien été entraîné à voie libre; mais immédiatement après, au passage de $D_1$, il est revenu à sa position initiale d'arrêt.

On verrait un effet analogue se produire si la position initiale du disque marquait *voie libre.*

*Ainsi : un courant atmosphérique ou un accident perturbateur ne peuvent modifier la position donnée au signal.*

Reste à parer à une négligence dans le remontage ou à une rupture du câble portant le poids moteur.

Pour le premier cas, le câble portant le poids est fixé sur le tambour A par l'intermédiaire d'un arc de cercle S rigide, mais articulé en U et normalement appliqué sur la surface du tambour. A la fin de la course, cet arc se développe, de façon que sa corde soit horizontale, et alors il va buter par son extrémité en saillie du reste, qui a abandonné la surface du tambour, contre un obstacle fixe V, lequel arrête alors le mouvement dans une position correspondant au signal à l'arrêt.

En cas de rupture du câble, le poids P (qui glisse le long de la colonne du disque) vient faire basculer le levier $\lambda$ qui arrache la goupille $\beta$ maintenant suspendu le poids $\delta$ ; le poids $\delta$ entraîne alors par l'intermédiaire de la chaîne $\mu$, passant par la poulie $\sigma$, la goupille de clavetage $\alpha$ de la poulie R. Le disque n'est plus alors soumis à l'action du câble T, et la chaîne $\mu$ dans son mouvement fait tourner la tige $\iota$ de 90° en entraînant le disque dans la position d'arrêt. Donc, que le poids n'ait pas été remonté ou ait rompu son câble, le signal vient toujours se fixer à l'arrêt.

Dans la pratique, avec un poids de 50 kg et une chute de 3 m, on peut obtenir 200 manœuvres consécutives et un seul fil de ligne suffit pour actionner l'appareil.

Pour la manœuvre simple, un commutateur ordinaire ouvrant ou fermant le circuit permettrait de mettre à l'arrêt ou à voie libre le signal ; les appareils C et D (*fig.* 23) décrits ci-après ne sont employés que lorsqu'on veut obtenir la mise à l'arrêt automatique du signal au passage même du train.

Le commutateur C se compose d'une manivelle $m$ portant deux cames $y$ et $z$ placées dans deux plans différents en arrière de la manivelle $m$. Dans le mouvement de rotation, la came $y$ vient appliquer l'armature $nn'$ contre l'électro-aimant W et, $n'$ venant au contact du ressort $x$, le circuit électrique est fermé et le disque est mis à voie libre.

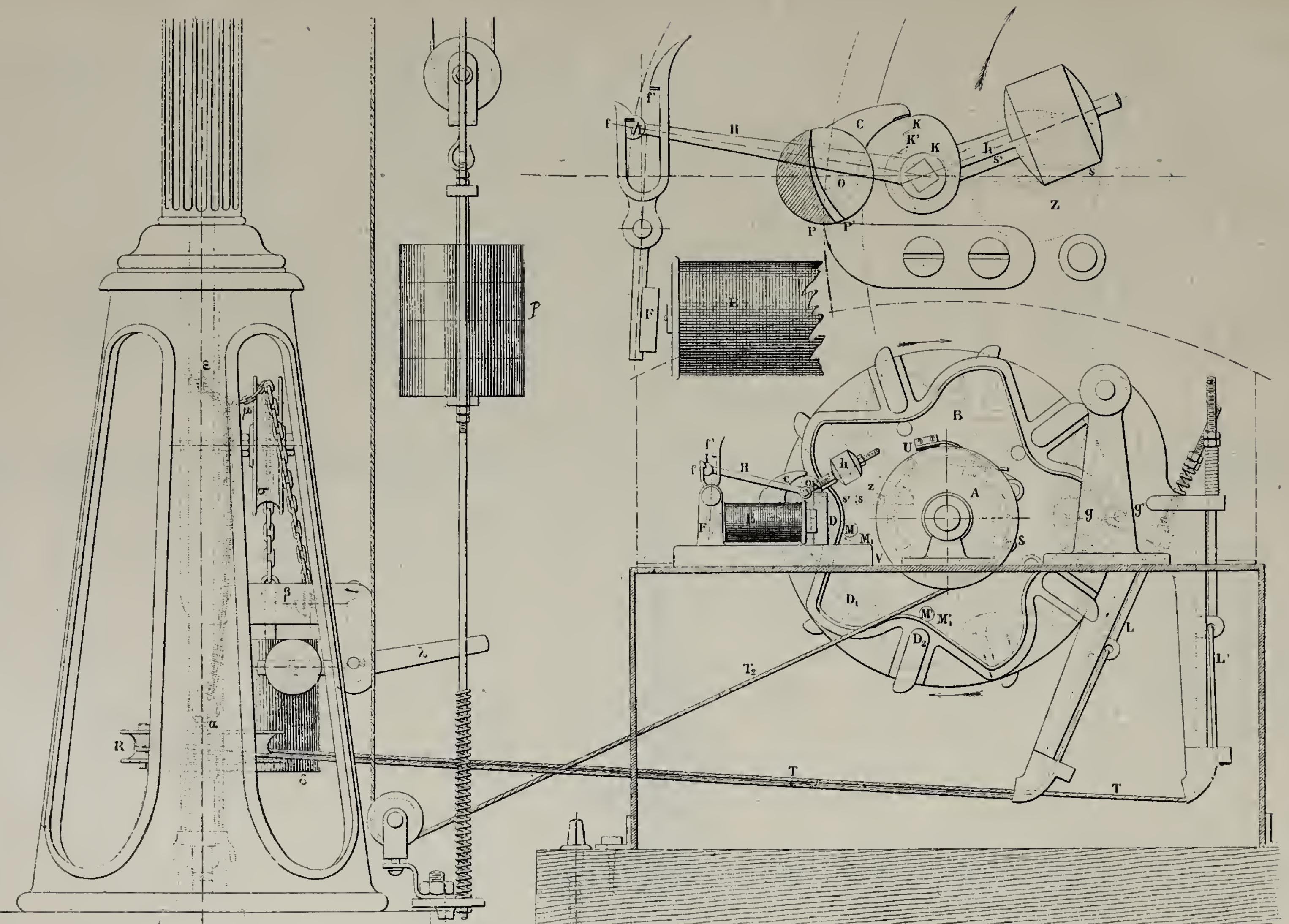


Fig. 24. — Appareil moteur du disque électrique Rodary.

En continuant le mouvement de rotation, la came $z$ évidée vient, par le moyen du téton $i$ et l'action du ressort de rappel, détacher l'armature de l'électro et rompre le contact de $n'$ avec $x$; le circuit électrique est coupé et le disque revient à l'arrêt.

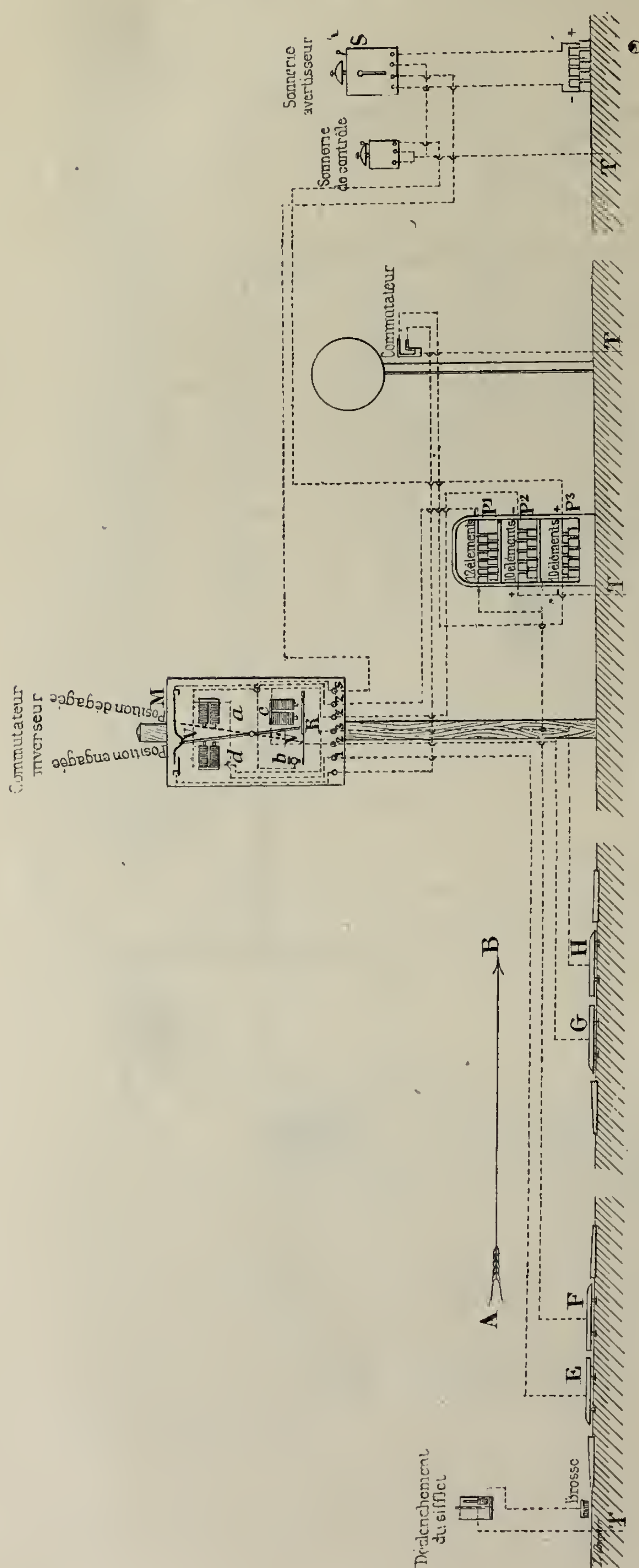



Fig. 25. — Appareil avertisseur à crocodile de la Compagnie du Nord.

Le disque, mis à voie libre par le commutateur décrit ci-dessus, est remis automatiquement à l'arrêt par le passage du train au moyen de la pédale D.

Le ressort $l$ de cette pédale, placée près du rail en dedans de la voie, fléchit sous l'action du boudin des roues du train et, par l'éloignement du contact $t$, qui réunit le plot 1 au plot 2, le circuit se trouve coupé et le disque se met à l'arrêt.

Dans ces conditions, l'armature $nn'$ du commutateur C quitte l'électro W sous l'influence du ressort de rappel et le circuit est également coupé en $n'x$ et y reste coupé, de sorte qu'après le passage du train la pédale, en reprenant sa position initiale, ne rétablit pas le courant, ce qui aurait pour effet de remettre le signal à voie libre avant que la gare n'ait mis son commutateur dans la position *arrêt*.

**Appareil avertisseur à crocodile pour voie unique de la Compagnie du Nord.** — Depuis longtemps déjà la Compagnie du Nord a adopté, sur ses lignes à double voie, le système avertisseur à crocodile, destiné à avertir les mécaniciens dès qu'un train a franchi un signal à l'arrêt et à aviser en même temps les agents des gares de l'approche de ces trains.

Ce système vient d'être étendu aux lignes à voie unique et voici comment le problème a été résolu :

En plus des deux crocodiles F et G (*fig.* 25) servant sur la double voie, l'un au déclenchement du sifflet des machines, l'autre à l'annonce des trains, on a installé deux autres crocodiles E et H qui ont pour but,

lorsque les trains circulent dans le sens où ils doivent actionner les appareils, le premier de provoquer la mise en charge des crocodiles F et G ; le second, de remettre les appareils dans leur situation normale.

Dans l'autre sens de circulation, les crocodiles E et H provoquent, au contraire, l'inertie des crocodiles F et G.

Un commutateur inverseur M, intermédiaire entre les groupes E, H et F, G de crocodiles, prépare les circuits sous l'action de chacun d'eux de façon à obtenir les effets précédents pour chaque sens de circulation.

Examinons maintenant, sur la figure 25, ce qui se produit pour chaque sens de circulation.

1° Sens de circulation AB. — En passant sur le contact E, la brosse des machines ferme le circuit d'une pile $P_2$ sur l'électro-aimant *a* qui provoque le renversement de l'armature de l'inverseur.

Le ressort V, qui était relevé, s'abaisse et rétablit la communication électrique entre le crocodile F et le commutateur spécial du disque. Lorsque ce dernier est fermé, la brosse, en passant sur le crocodile F, complète le circuit de la pile $P_1$ qui se ferme sur le sifflet de la locomotive.

Au passage sur le crocodile G, l'armature R, qui n'est plus enclenchée par l'armature de l'inverseur, est attirée par l'électro C et établit une communication électrique avec la sonnerie avertisseuse S, qui déclenche.

Enfin, la brosse, en passant sur le crocodile H, ferme le circuit de la pile $P_2$ sur l'électro *d*, qui attire l'armature de l'inverseur et la replace dans la position indiquée sur la figure ; l'armature R se trouve de nouveau enclenchée.

2° Sens de circulation BA. — Le passage de la brosse d'une machine sur le crocodile H ne produit aucun effet.

En passant sur le crocodile G, un courant est bien envoyé dans l'électro *c*, mais il ne produit aucun effet, puisque l'armature correspondante R est calée.

La brosse, en arrivant sur le crocodile F, ne peut plus produire le déclenchement du sifflet des machines, puisque le circuit se trouve interrompu en V, qui est relevé.

Enfin, le passage sur le crocodile E a pour effet de fermer le circuit de la pile $P_2$ sur l'électro-aimant *a* et, par suite, de renverser l'armature de l'inverseur ; ce déplacement ne présente aucun inconvénient, car : ou bien un train se présente immédiatement dans le même sens BA et la brosse, en passant sur le crocodile H, remet l'armature de l'inverseur sur la position « engagée », qui est celle de la figure, et la replace ensuite dans l'autre position en passant sur E ; ou bien un train se présente dans le sens AB et, l'armature de l'inverseur se trouvant dans la position dégagée, les connexions sont préparées pour fournir une annonce.

**Porte-pétard électrique de la Compagnie du Nord.** — La Compagnie du Nord a étudié et appliqué un dispositif électrique qui permet de faire placer, à telle distance qu'on veut du commutateur, un pétard sur les rails, au point où on désire avertir le mécanicien et indépendamment de la manœuvre des leviers de signaux, tout en enclenchant, s'il y a lieu, le cas échéant, la manœuvre du commutateur avec celle des signaux.

L'appareil porte-pétard est enfermé dans une boîte en fonte AA' (*fig.* 26), placée parallèlement à la voie. Un noyau de fer doux DD' se meut dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il est sollicité par la bobine B ou par la bobine C. Ce noyau commande un axe vertical à l'extrémité duquel est fixé horizontalement le porte-pétard, qui peut, par suite, occuper deux positions à 90° l'une de l'autre.

Trois fils sont nécessaires pour l'envoi du courant dans le sens voulu : un pour une extrémité de chaque bobine, l'autre servant de retour commun pour les deux autres extrémités.

Le commutateur de manœuvre est à deux directions. Pour que la durée du courant soit fonction de la manœuvre de l'appareil porte-pétard, celui-ci est muni d'un interrupteur automa-

tique V calé sur l'axe vertical FF' et composé d'un tambour isolant muni de deux touches métalliques et de quatre frotteurs QQ'. Les deux touches sont, d'ailleurs, disposées de manière que,

SCHÉMA DE L'ÉLECTRO-AIMANT.

Fig. 26. — Porte-pétard électrique de la Compagnie du Nord.

Fig. 27. — Connexions du porte-pétard électrique monté avec le circuit de lumière.

lorsque l'une provoque la rupture du circuit de l'une des bobines, l'autre prépare la fermeture du circuit de l'autre bobine, et réciproquement.

Deux verrous placés sur les joues extrêmes du solénoïde sont destinés à empêcher le pétard de se déplacer intempestivement. Dès qu'un courant passe dans le solénoïde, le verrou engagé dans l'encoche est immédiatement, grâce à sa faible masse, soulevé par l'attraction du noyau et permet ainsi à celui-ci de se mouvoir. Au contraire, dès que ce courant est interrompu, les verrous retombent dans les encoches et immobilisent le pétard.

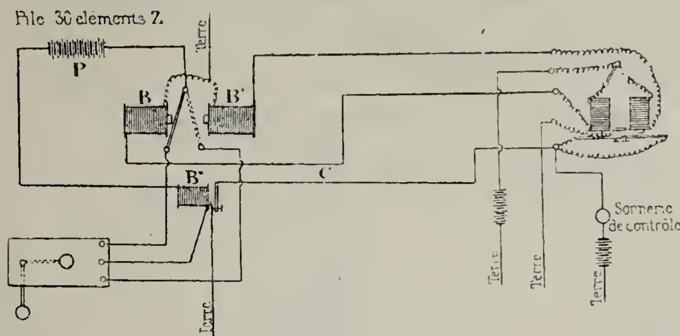



Fig. 28. — Schéma des connexions du porte-pétard électrique monté avec une pile.

Le commutateur de manœuvre permet également de contrôler la position des pétards (*fig.* 27). Pour cela, on a placé, dans le circuit de chaque solénoïde de manœuvre, des électro-aimants qui actionnent des voyants indicateurs de la position que prend le pétard après chaque manœuvre ; en même temps, un courant local, fermé par l'armature de ces électros, actionne une sonnerie qui tinte jusqu'à ce que la manœuvre ait été réellement terminée.

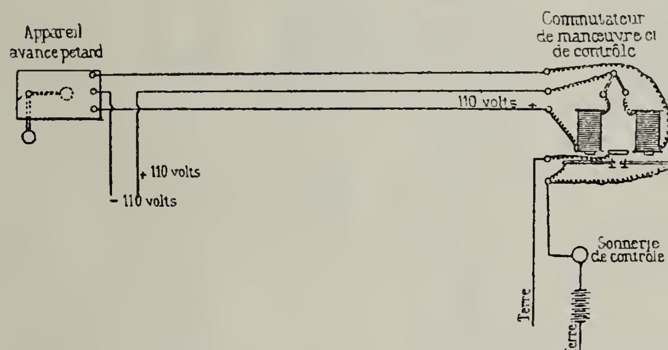



Fig. 29. — Connexions du porte-pétard électrique actionné par le signal.

Lorsqu'on se sert d'une pile pour la manœuvre du porte-pétard, la pile principale, montée en gros éléments peu résistants, est actionnée à distance à l'aide d'un relais et de quelques éléments ordinaires (*fig.* 28). Le courant de la pile locale passe également dans un électro-aimant B qui attire son armature tant que le courant qui circule dans l'appareil porte-pétard ne s'est pas interrompu de lui-même ; c'est alors l'armature B″ qui actionne la sonnerie de contrôle du poste de manœuvre. L'armature de relais BB′ conserve toujours la position qu'on lui a fait prendre en dernier lieu. Enfin, quand l'appareil porte-pétard doit être actionné soit par le signal lui-même, soit par la transmission de ce signal, il y a lieu d'installer un commutateur spécial (*fig.* 29).

Le contrôle est encore effectué au poste de manœuvre par le commutateur à manivelle, à l'axe duquel on fait faire un demi-tour, de manière à réunir en permanence les trois frotteurs.

On a recours à cette dernière solution : 1° quand le porte-pétard est commandé par plusieurs leviers d'une même cabine ou de cabines différentes ; 2° quand le signal à doubler d'un pétard est muni d'une pédale Aubine : le pétard n'est alors placé que lorsque l'aiguille confirme, par la manœuvre de son levier, la mise à l'arrêt automatique du signal.

### D] APPAREILS DE CONTROLE

**Répétiteur de sémaphore de la Compagnie de l'Est.** — Il est souvent utile de connaître la position des grande et petite ailes d'un sémaphore.

A cet effet, les services techniques de la Compagnie de l'Est ont établi des appareils qui répètent, à l'aide de petits bras en miniature, les positions des ailes de sémaphore. La figure 30 donne le schéma des communications.

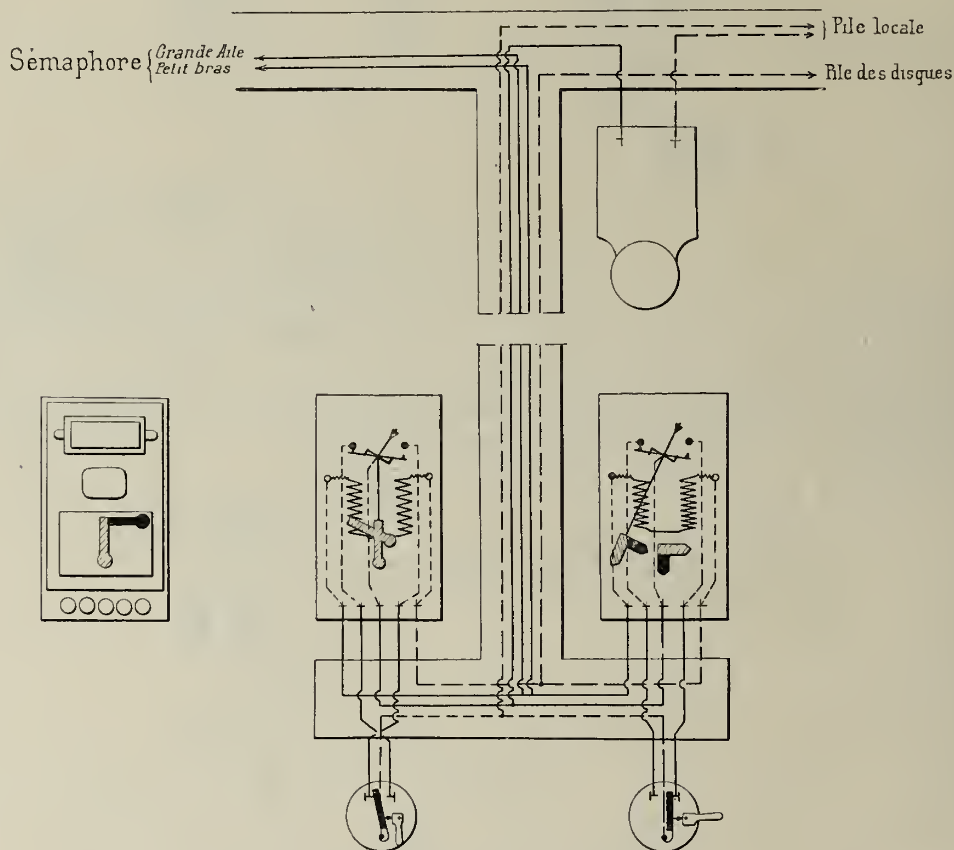



Fig. 30. — Répétiteur de sémaphore.

Les répétiteurs sont constitués par des armatures en forme de Z qui sont attirées lorsque le courant passe dans les électro-aimants. A chaque changement de position d'une aile, une sonnerie continue se fait entendre jusqu'à ce qu'on inverse la position du commutateur à levier correspondant.

Les commutateurs appliqués aux sémaphores se composent d'un secteur S, mobile autour d'un axe (*fig*. 31). Trois ressorts viennent frotter sur ce commutateur. Lorsque le petit bras est vertical, le circuit de pile se trouve fermé et le courant passe ; lorsque le petit bras est horizontal, le courant est au contraire interrompu.

S'il s'agit de la grande aile, le courant est interrompu pour le répétiteur lorsque cette aile est verticale ; mais, par contre, le circuit se trouve fermé sur une sonnerie lorsque, comme le cas se présente, on veut, à un poste éloigné, connaître la position de la grande aile avant d'expédier un train dans la section de bloc. Si la sonnerie ne tinte pas, c'est que la section est bloquée ou qu'il y a un dérangement, et alors il faut se renseigner auprès du sémaphoriste sur

les dispositions à prendre; il convient d'ajouter que ces postes éloignés sont toujours reliés aux sémaphoristes par appareils de correspondance Jousselin.

Le secteur S est actionné par une manivelle M, dont la coulisse peut recevoir un doigt de conduite N qui se fixe par une vis de pression au point convenable de la tringle de manœuvre, soit de la grande aile, soit du petit bras de sémaphore. Suivant qu'on utilise deux ou trois ressorts, on réalise toutes les combinaisons de circuit nécessaires dans les divers cas prévus.

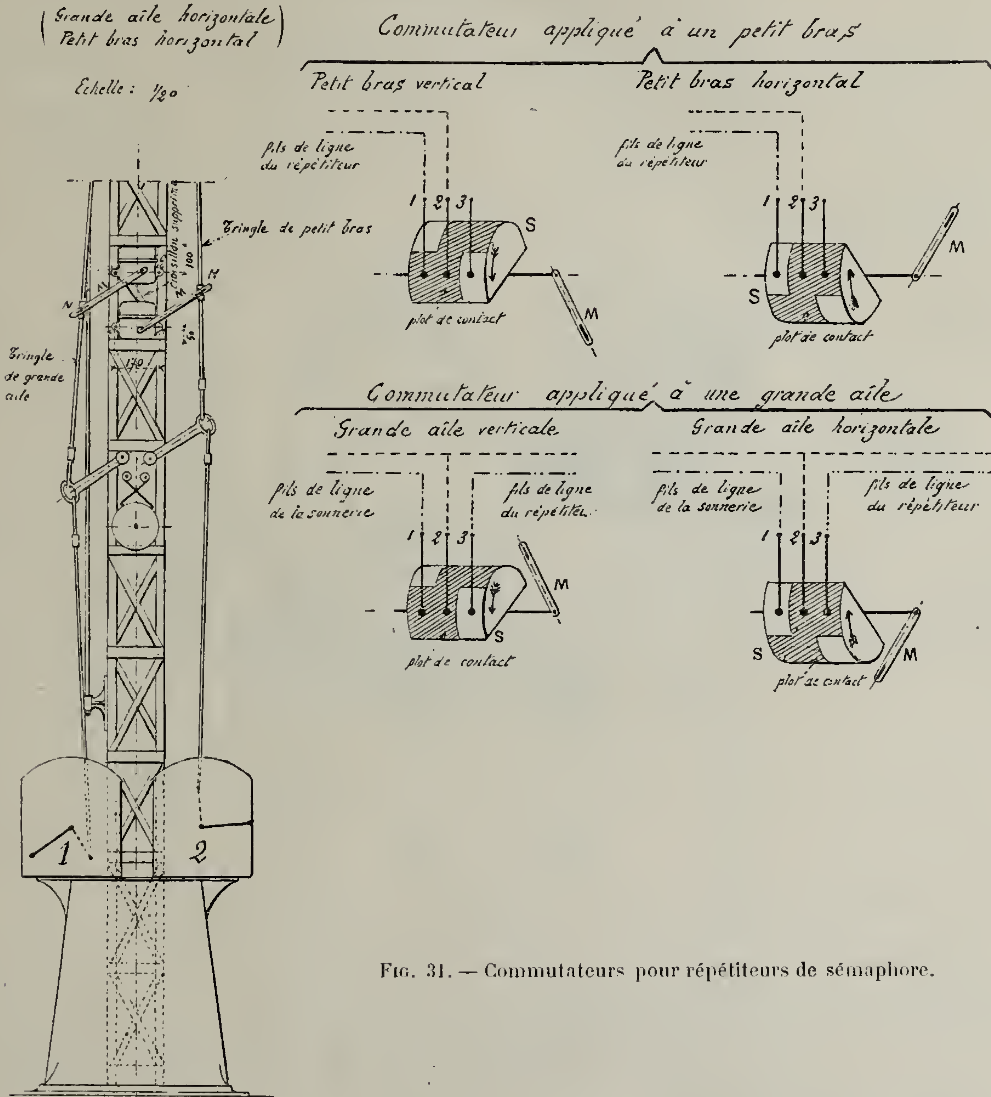



Fig. 31. — Commutateurs pour répétiteurs de sémaphore.

**Contrôleur-enregistreur électrique de la vitesse des trains (type Est).** — Cet appareil portatif est contenu dans une boîte en bois renfermant également la pile sèche qui l'actionne.

Il se compose d'un mouvement d'horlogerie faisant dérouler, d'une vitesse uniforme, un tambour T. Une sonnerie S dont le marteau porte une pointe placée à faible distance du tambour complète cet ensemble (*fig.* 32).

Lorsque le tambour a été mis en mouvement par la manœuvre du déclic D et que le circuit électrique de l'enregistreur est fermé, la pointe perfore le papier suivant une ligne dont la longueur est proportionnelle à la durée de fermeture du circuit, c'est-à-dire au temps que met

un train à parcourir la distance entre deux pédales placées sur la voie à 20 m l'une de l'autre. Après le passage du train, on lit la vitesse du train au moyen d'une échelle graduée que l'on place sur la bande de papier.

Pour obtenir des indications exactes, il est essentiel de remonter le mouvement d'horlogerie après chaque expérience.

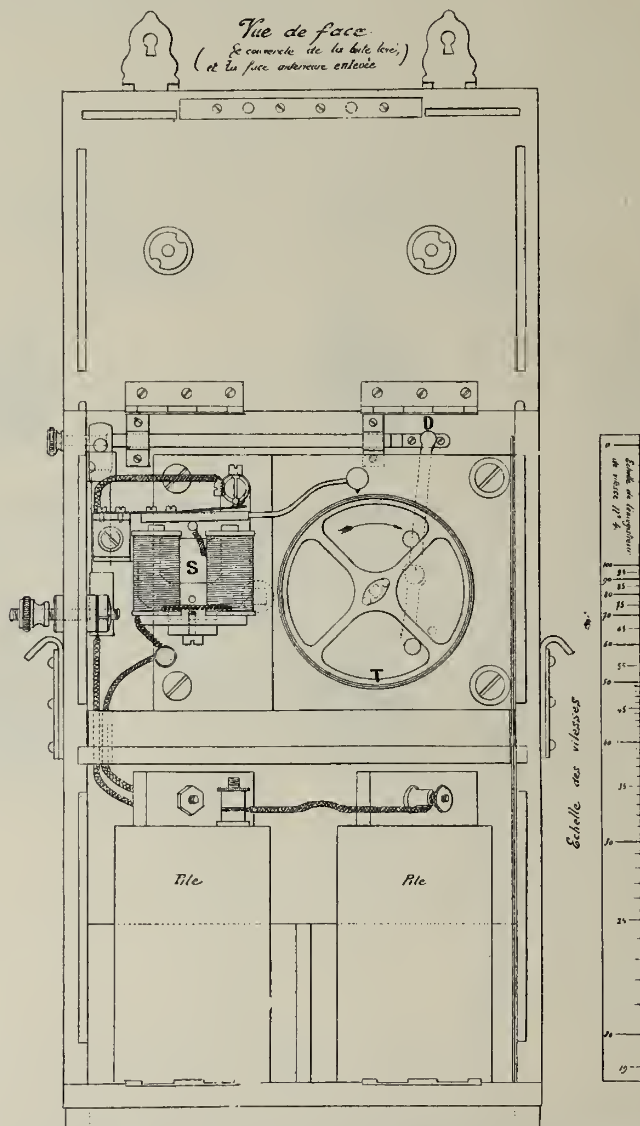



Fig. 32. — Contrôleur-enregistreur électrique de la vitesse des trains.

Le support de la pédale numéro 1 (Voir *fig.* 33) porte un ressort isolé et reçoit l'axe de la pédale, dont le doigt supérieur doit dépasser de 0,02 m le rail. Dans cette position, le ressort isolé porte sur la partie isolée de la pédale.

Pour la pédale numéro 2, le ressort porte, au contraire, sur un plot d'argent. Les deux pédales sont reliées entre elles et à l'enregistreur par un fil à deux conducteurs et un fil simple B.

Le passage d'un train sur la première pédale fait abaisser le doigt supérieur et ferme le circuit de l'enregistreur. Ce circuit est coupé au moment du passage du train sur la deuxième pédale.

Les pédales se fixent sur le patin du rail à l'aide de ressorts.

Ces appareils enregistreurs sont employés à la Compagnie de l'Est par le service de la voie depuis 1894.

**Contrôleur de signaux de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Ces appareils ont pour but d'indiquer si un signal que l'on ne peut voir est bien à l'arrêt ou à voie libre.

Ils se composent essentiellement d'un commutateur placé sur une des parties mobiles du signal, l'axe en général, et d'une sonnerie ou bien d'un répétiteur à voyant semblable à celui qui est représenté figure 34 et qui est très sensible. — Il est constitué par

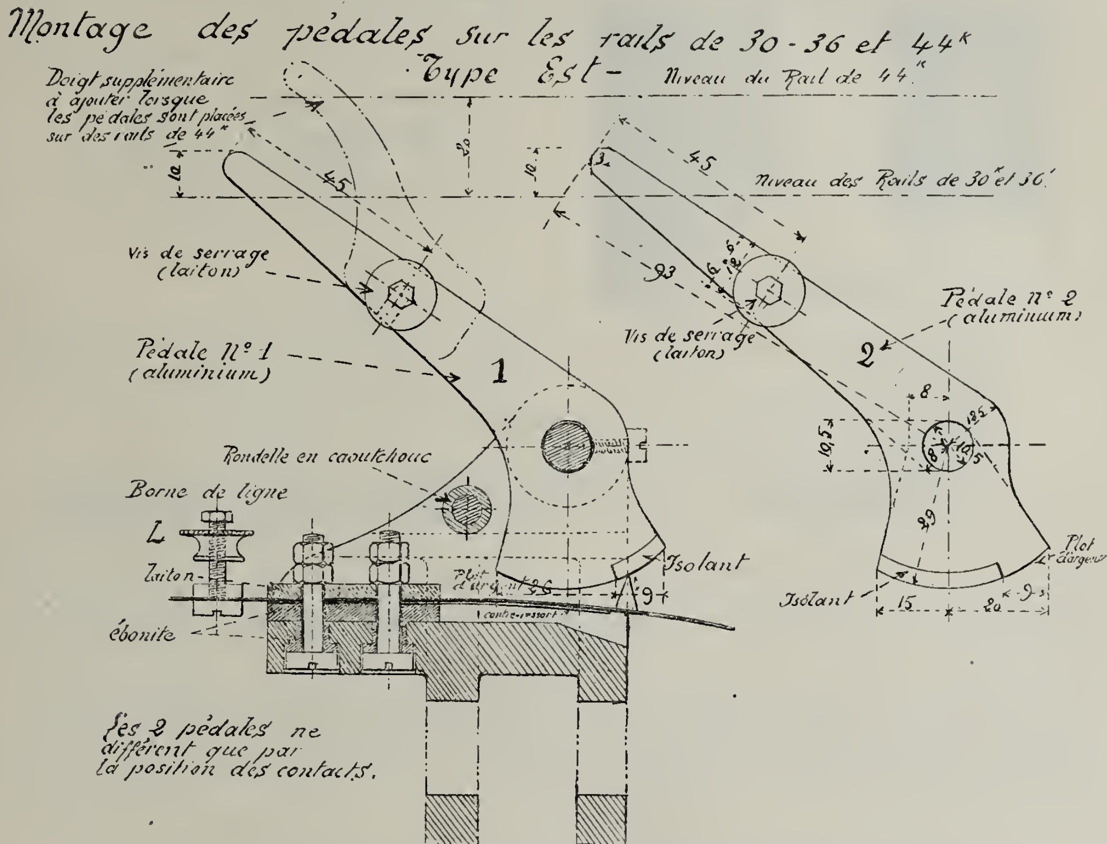



Fig. 33. — Montage des pédales du contrôleur-enregistreur de la vitesse des trains.

un électro-aimant dont les épanouissements polaires A et B embrassent une armature $cc'$, en forme de Z, qui porte un voyant rouge V ; ce voyant tend à s'écarter de la verticale sous l'influence du contrepoids P ; il reprend cette position W lorsqu'un courant actionnant les électro-aimants attire les deux branches du Z.

Lorsque le signal correspondant est bien à l'arrêt, son commutateur ferme le circuit d'une pile sur le répétiteur ou la sonnerie et l'on voit apparaître le voyant rouge dans le guichet du répétiteur, ou l'on entend un tintement persistant de la sonnerie.

**Contrôleur d'allumage de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Cet appareil, appelé photoscope, sert à indiquer, la nuit, si la lanterne des signaux reste bien allumée. C'est une sorte de thermomètre métallique formé par une spirale S (*fig* 35), composée de deux métaux d'inégale dilatation, cuivre et acier, que l'on dispose à la partie supérieure de la cheminée de la lanterne. La chaleur fait ouvrir la spirale qui, par pression de son extrémité *a*, met en contact deux ressorts, fermant ainsi le circuit de la sonnerie de contrôle, qui tinte d'une

façon continue et s'arrêterait si la flamme venait à s'éteindre, la spirale se resserrant par le froid et cessant de presser l'un contre l'autre les ressorts qui, alors, coupent le circuit.

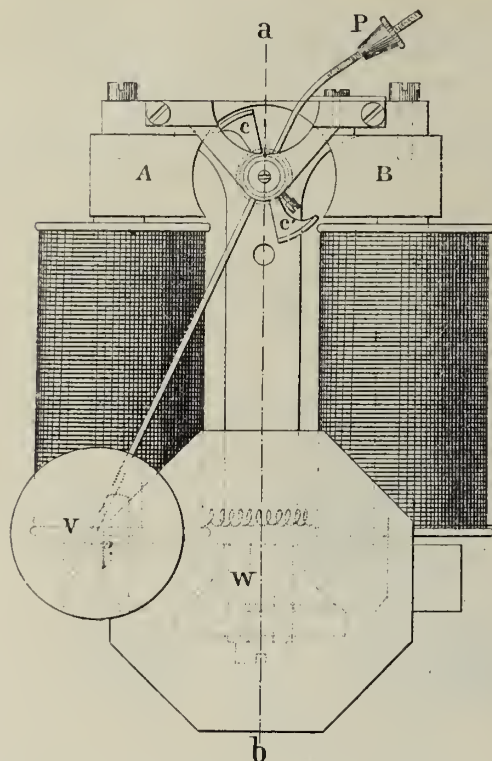


Fig. 34. — Contrôleur de signaux.

Le photoscope est disposé dans le même circuit que le commutateur du signal, de sorte que la sonnerie ou le répétiteur n'entre en fonction la nuit qu'à la double condition que le signal soit bien à l'arrêt et que la lanterne soit bien allumée. Durant le jour, le courant se trouvant normalement interrompu au photo-

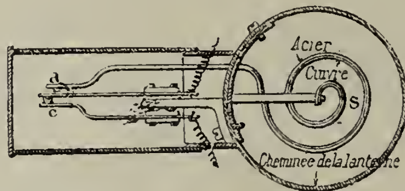


Fig. 35. — Photoscope.

scope, il faut retirer celui-ci du circuit et rétablir la continuité de ce circuit. Cet effet est obtenu au moyen de deux petits appareils accessoires dits patins et disjoncteurs.

**Contrôleur d'aiguilles, système Chaperon, de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Cet appareil a pour but d'indiquer, par le tintement d'une sonnerie, les cas où les lames de l'aiguille ne sont pas bien appliquées contre le rail ; il sert aussi à marquer la direction donnée par l'aiguille.

Il se compose d'un commutateur à secteur B (*fig.* 36), susceptible de tourner autour de l'axe O sous l'action, soit du contrepoids Q, soit de la tige *e* qui traverse le rail, lorsque celle-ci est repoussée par la lame d'aiguille voisine ; le secteur S réunit électriquement ou isole deux ressorts qui se profilent en *r* sur la figure.

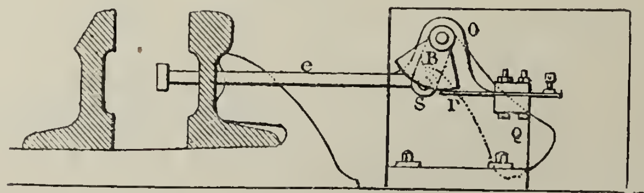


Fig. 36. — Contrôleur d'aiguilles système Chaperon.

Pour vérifier simplement la position d'une aiguille, il suffit de placer un seul appareil du côté de la lame qui doit se trouver normalement appliquée contre le rail et dont on peut vérifier la position.

Pour contrôler la jonction des deux lames, on dispose un contrôleur à chaque lame, de façon à ce que, dès que l'aiguille est entre-bâillée en quittant le contact du rail de 4 mm, une sonnerie se fasse entendre, sonnerie qui s'arrêtera, du reste, lorsque la lame sera de nouveau appliquée contre l'un ou l'autre rail.

### *E*] APPAREILS ÉLECTROMÉCANIQUES

**Chariot électrique transbordeur sans fosse de la Compagnie d'Orléans.** — Cet appareil est installé à la gare de Paris sur un chemin de roulement de 150 m de longueur et dessert 20 voies.

Il se compose de deux chariots proprement dits : l'un est un chariot porteur du type employé aux Chemins de fer Paris-Lyon-Méditerranée, sauf pour les galets, qui sont munis de boudins s'engageant dans une ornière ménagée entre deux rails Vignole qui constituent le chemin de roulement, et sauf aussi le mode d'arrêt, qui consiste en crochets, susceptibles de s'abattre contre des entretoises et d'immobiliser ainsi le chariot ; ces crochets (*fig.* 37) servent à réunir les deux chariots.

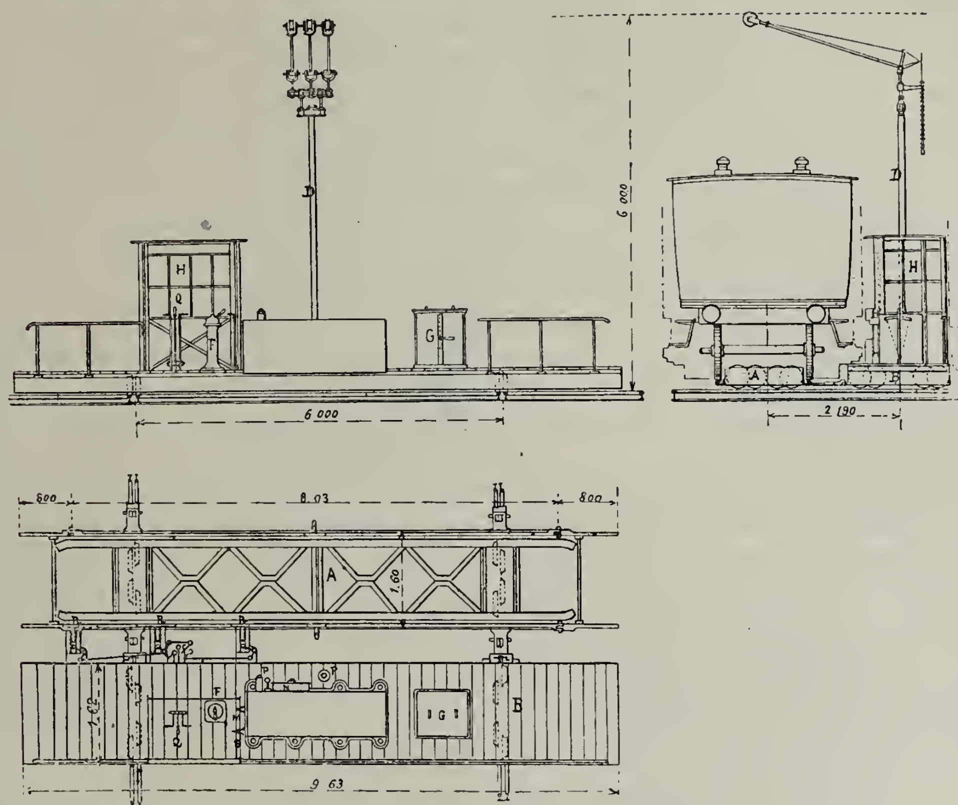



Fig. 37. — Chariot électrique transbordeur.

L'autre chariot constitue le tracteur ; il porte aussi un tambour pour le halage des véhicules.

Le moteur électrique conduit, par l'intermédiaire d'engrenages réducteurs et d'un limitateur de force, l'arbre des embrayages. Cet arbre est susceptible d'actionner soit un second arbre à pignon double portant des chaînes de Galle qui, finalement et par deux essieux intermédiaires du truck, transmettent le mouvement aux galets ; soit, par vis sans fin, une grande roue qui entraîne le tambour du cabestan de halage.

Tous ces organes sont portés par un châssis-caisse en fonte qui repose sur le truck par l'intermédiaire de rondelles Belleville.

Le conducteur, abrité dans une cabine vitrée, commande :

1° Par le levier M, l'embrayage du moteur sur l'un des deux mouvements, translation ou halage ;

2° Par la manette du combinateur F, la marche avant ou arrière avec cinq vitesses progressives ; cette manette abandonnée revient d'elle-même au zéro;

3° Par les trois leviers Q agissant sur les trois cales R, l'immobilisation de la voiture sur le chariot;

4° Par le levier S actionnant un verrou, le calage du chariot au droit de chaque voie transversale.

Le combinateur porte un certain nombre de touches reliées électriquement à cinq commutateurs à relais magnétique du système de la maison Sautter et Harlé, et ce sont ces derniers qui, en s'abattant automatiquement, coupent et ferment les circuits très rapidement sur contacts en charbon, supprimant ainsi les inconvénients des étincelles de rupture.

La prise de courant s'effectue sur une ligne aérienne par un trolley.

**Appareils d'enclenchement électriques de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Ces appareils ont pour but de réaliser, entre des signaux et aiguilles éloignées et manœuvrées sur place, les mêmes enclenchements que ceux qui sont établis, dans les postes Viguier et Saxby, entre des leviers de manœuvre réunis sur un même bâti; notamment, par exemple, ils réalisent l'enclenchement réciproque entre l'aiguille d'un embranchement particulier situé en plein air et les signaux de protection placés en un poste éloigné, de telle façon que l'aiguille ne puisse être ouverte que si les signaux ont été préalablement enclenchés à l'arrêt et que ces signaux ne puissent être effacés que si l'aiguille a été remise à sa position normale. Ils servent aussi parfois plus simplement à faire commander une aiguille ou un signal par un poste, de façon que ces appareils ne puissent être manœuvrés qu'avec l'autorisation de ce poste.

La Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée emploie à cet usage un petit verrou s'adaptant à son type de leviers Saxby, un autre susceptible de s'appliquer à un levier quelconque et enfin des commutateurs-répétiteurs manœuvrés à la main et indépendants des leviers.

*Verrou de poste Saxby.* — Le verrou, spécialement destiné aux postes Saxby, se compose d'une boîte en fonte A, que l'on fixe sur la traverse supérieure du bâti qui supporte les grils d'enclenchement (*fig.* 38), et d'un secteur B boulonné sur le gril même du levier à commander. La boîte A constitue une véritable serrure avec son mécanisme, dont le secteur B est la gâche. Le mécanisme consiste en une tige L qui peut se déplacer verticalement en suivant les oscillations d'un balancier auquel elle est rattachée comme une bielle. Le balancier se compose de deux bras, $t$ et $t'$, mobiles autour des axes $o$ et $o'$ et réunis entre eux à leur extrémité par une bielle $t''$. Cette disposition a pour but d'augmenter la course de la tige L par rapport au mouvement de l'armature. L'axe $o'$ est taillé en couteau, de façon à diminuer les frottements et à rendre l'appareil plus sensible. Le bras $t$ porte une armature en fer doux D, susceptible d'être attirée par un électro-aimant E quand on fait passer un courant dans celui-ci.

Au repos, c'est-à-dire quand aucun courant ne passe, la tige L agit seule, par son propre poids, sur le balancier; l'armature se trouve alors éloignée des pôles de l'électro-aimant et la tige L pénètre, à travers une ouverture-guide $c$, dans un trou F ménagé dans le secteur B qui est ainsi rendu solidaire de la pièce A. En d'autres termes, le pêne pénètre dans la gâche et la serrure est fermée ; le gril ne peut plus tourner et le levier correspondant ne peut plus être manœuvré.

Si un courant est envoyé dans l'électro-aimant, l'armature D est attirée, le bras inférieur $t$ du balancier s'incline du côté de l'armature et la tige L, relevée dans ce mouvement, dégage le trou F du secteur qui est alors libéré. La serrure est ouverte, le gril peut tourner et la manœuvre du levier correspondant est possible.

Pour pouvoir régler l'attraction de l'armature, le bras $t$ porte un goujon $a$ qui s'engage entre les deux branches d'une fourchette H, mobile autour d'un axe $o''$ et munie à son extrémité $g$ d'un ressort en boudin actionné par un bouton moleté. Des poids $p$, dont on charge l'extrémité du levier $t$, permettent de contre-balancer l'action du ressort quand cela est nécessaire.

Une tige $l$, soudée sur la fourchette H, porte, à la partie supérieure, un voyant V peint en

blanc, que l'on peut apercevoir à travers une ouverture triangulaire ménagée dans la boîte en fonte qui contient l'appareil et dont le fond est rouge. Quand la tige L est abaissée, c'est-à-dire quand elle enclenche le secteur, le voyant V est invisible; si, au contraire, la tige L est relevée par suite de l'attraction de l'armature D, le voyant blanc apparaît, ce qui indique que le secteur est devenu libre et que le levier correspondant peut être manœuvré.

Tel qu'il est décrit, l'appareil permettrait d'opérer l'enclenchement d'un levier de Saxby, car il suffirait de faire passer ou d'interrompre le courant dans les bobines au moyen d'un

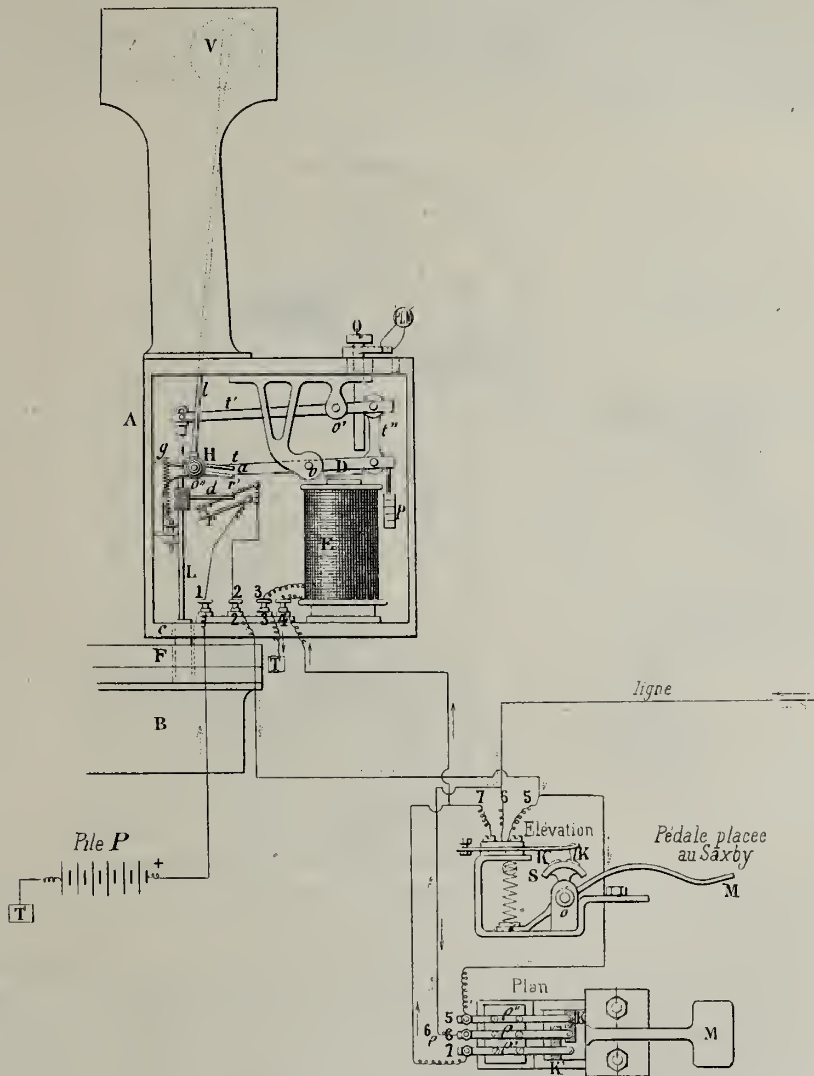



Fig. 38. — Verrou de poste Saxby.

commutateur pour libérer ou immobiliser le gril. Mais, en général, il est nécessaire que les enclenchements électriques soient réciproques, c'est-à-dire qu'il faut que l'appareil au moyen duquel le courant a été établi pour permettre la manœuvre se trouve lui-même enclenché lorsque le levier auquel est appliqué le verrou a été manœuvré.

De cette façon, l'agent qui a autorisé la manœuvre du levier d'un poste peut se rendre compte si cette manœuvre est bien effectuée.

Pour obtenir ce résultat, sur la tige L est fixé au moyen d'une matière isolante un doigt $d$ qui, dans le mouvement de descente, vient buter contre deux petits ressorts $r$ et $r'$, qui sont mis en contact quand la tige est à fond de course, c'est-à-dire quand le gril est immobilisé.

En outre, une pédale, placée entre les leviers de manœuvre du Saxby, permet de ne fermer qu'au moment voulu le circuit dans lequel se trouvent les bobines du verrou. Cette pédale se compose d'un secteur en fonte S, recouvert d'ébonite et pouvant osciller autour d'un axe *o* lorsqu'on appuie le pied sur le levier M. Un ressort en boudin rappelle dans sa position primitive le secteur quand le pied abandonne le levier M. Sur l'ébonite du secteur sont ajustées deux lames d'argent K et K′ qui font communiquer entre eux, soit les ressorts ρ et ρ″, soit les ressorts ρ et ρ′, suivant la position du secteur.

Un bouton Q, placé sous scellé, permet d'annuler le verrou en cas de dérangement; il suffit, pour cela, de briser le scellé, de dégager le crochet qui maintient le bouton relevé, d'appuyer sur celui-ci et de le caler avec le crochet. La tige du bouton vient alors appuyer sur l'armature D et maintient la tige L relevée.

Fig. 39. — Verrou universel système Rodary.

*Verrou universel système Rodary.* — Il se compose (*fig.* 39) d'une boîte en fonte dans laquelle peut glisser, sur la gorge de deux poulies P et P′, une règle rectangulaire S. Cette règle porte une entaille K présentant d'un côté un plan incliné sur lequel peut glisser un pêne T. La tête de ce pêne vient buter contre un levier L mobile à l'une de ses extrémités autour d'un axe *o*. L'autre extrémité s'engage sous la came *m* d'un axe évidé *o′o″*, commandé par l'intermédiaire de la bielle *c* par l'armature D d'un électro-aimant E. Quand l'armature est attirée, la bielle *c* fait tourner l'axe *o′o″* et la came *m* dégage l'extrémité du levier L. Si, alors, on exerce une traction sur la règle S, le pêne T glisse sur la partie inclinée de l'entaille K, relève le levier L et la manœuvre du levier auquel est adapté le verrou est possible.

Un contrepoids, que l'on peut rapprocher plus ou moins de l'axe de rotation ω de l'armature, permet de régler l'attraction de cette dernière.

Une tige *l*, rendue solidaire par la fourchette H des mouvements de l'armature, porte un voyant V blanc et rouge.

Ce voyant est aperçu à travers une fenêtre C pratiquée dans le couvercle en fonte de l'appareil. Lorsque l'armature D est attirée, la came *m* dégage l'extrémité du levier L par suite de la

rotation de l'axe $o'o''$, la partie blanche du voyant est visible et le levier est libre ; si, au contraire, l'armature n'est pas attirée, la came $m$ cale le levier L et la partie rouge du voyant apparaît, ce qui indique que le verrou ne peut pas être manœuvré.

Un doigt $a$, solidaire du levier L, maintient le voyant au blanc et l'armature D appliquée sur les pôles de l'électro-aimant tant que le levier L est relevé, c'est-à-dire tant que le pêne T n'est pas revenu dans son entaille K.

Tel qu'il est décrit, l'appareil permettrait d'opérer l'enclenchement d'un levier, car il suffit de faire passer ou d'interrompre le courant dans les bobines pour libérer ou immobiliser le levier L ; mais, comme nous l'avons vu, il faut que l'appareil au moyen duquel le courant est établi pour permettre la manœuvre se trouve lui-même enclenché lorsque le levier correspondant au verrou a été manœuvré. Pour obtenir ce résultat, l'axe $o'o''$ porte un doigt $d$ qui, dans

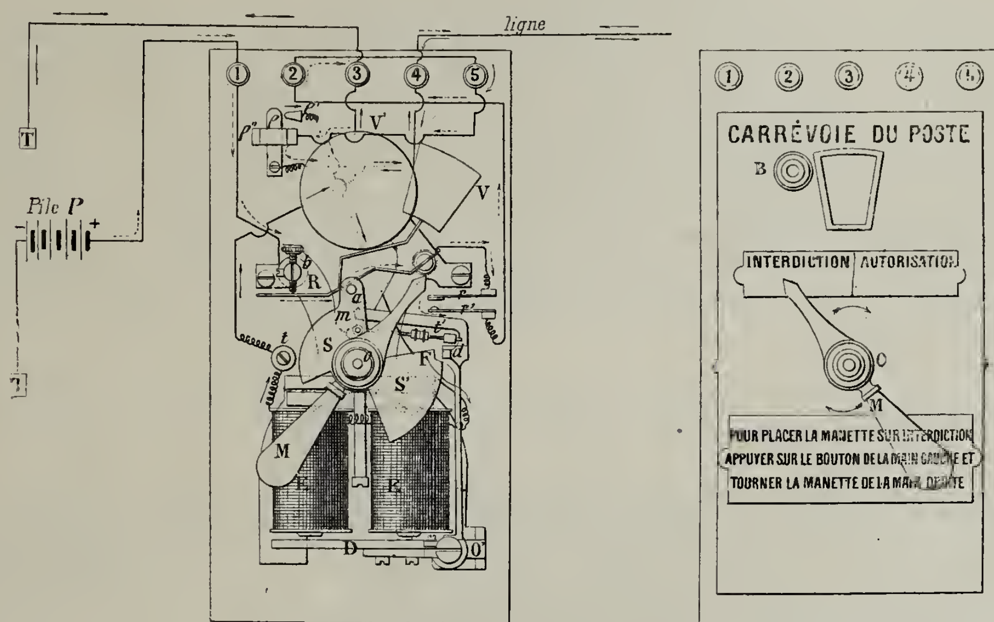



Fig. 40. — Commutateur-répétiteur.

le mouvement de rotation de cet arbre, interrompt le contact entre deux petits ressorts $r$ et $r'$, contact qui n'a dès lors lieu que lorsque la came $m$ enclenche l'extrémité du levier L. En outre, une pédale semblable à celle employée pour le verrou précédent permet de ne fermer qu'au moment voulu le circuit dans lequel se trouvent les bobines du verrou.

*Commutateur-répétiteur.* — Le commutateur-répétiteur est destiné à verrouiller à distance soit des leviers isolés, soit des leviers faisant partie d'un poste d'enclenchement. Cet appareil est manœuvré à la main. Il se compose d'une manette M (*fig.* 40), que l'on peut incliner, soit dans la position « Autorisation », soit dans la position « Interdiction ». Cette manœuvre fait mouvoir deux secteurs S et S' fixés sur son axe; lorsqu'on amène la manette sur « Autorisation » en la faisant tourner de droite à gauche, un goujon $a$ fixé sur le secteur S soulève un ressort R qui vient s'appuyer contre un contact $b$ et fermer le circuit de la pile P. Si, au contraire, la manette est mise sur « Interdiction », le ressort R revient à sa position primitive et le circuit est coupé.

Le poste qui a la manœuvre de cet appareil doit pouvoir se rendre compte que la manœuvre du verrou qu'il a autorisée est bien effectuée et ne doit pas pouvoir remettre la manette sur « Interdiction » tant que le levier du verrou commandé est dans la position autorisée. Dans ce but, le secteur S' porte une encoche F dans laquelle peut venir se loger un doigt $d$ fixé au grand bras $l$ d'une équerre mobile autour d'un axe O'. Le petit bras de cette équerre porte l'armature D d'un électro-aimant E. Si la manette est mise sur « Autorisation » et si aucun

courant ne passe, ce qui a lieu lorsque le levier commandé, dont la manœuvre a été autorisée, a été manœuvré, l'armature D, n'étant pas attirée, fait par son propre poids pivoter l'équerre autour de l'axe O; le doigt d'arrêt *d* pénètre dans l'encoche F du secteur S′ et la cale dans cette position. Si, au contraire, un courant est envoyé dans les bobines de l'électro-aimant, l'armature D est attirée, le doigt *d* dégage l'encoche F et la manette peut être remise dans la position d'interdiction.

Les mouvements de l'armature sont rendus visibles au moyen d'un voyant blanc V que l'on aperçoit à travers une fenêtre percée dans le couvercle de la boîte et qui est rendu solidaire de la tige *l* par une articulation *m*. Lorsque la manette est sur « Interdiction », le voyant V est blanc, et, lorsque aucun courant ne passe dans les bobines, le voyant V disparaît et laisse voir à travers la fenêtre un voyant rouge fixe V′.

Pour que le verrou du poste commandé ne puisse être manœuvré que si le secteur S′ est bien enclenché par le doigt *b* et, par suite, que si la manette est bien calée dans la position « Autorisation », une tige *t*′, fixée à l'articulation *m*, porte une masse isolante qui vient buter sur les ressorts *r* et *r*′, qui sont alors mis en contact. Ces ressorts sont placés sur le circuit de la pile P qu'emprunte le verrou commandé pour être manœuvré. Lorsque l'on a amené la manette sur « Autorisation », si le doigt *d* n'a pas pénétré dans l'encoche F, les ressorts *r* et *r*′ ne sont pas en contact; le circuit de la pile P est coupé et le verrou commandé ne peut être manœuvré, car aucun courant ne passera dans ses bobines quand on appuiera sur la pédale.

En outre, un bouton B placé sur le couvercle de l'appareil permet de ne fermer le circuit dans lequel se trouvent les bobines du commutateur qu'au moment voulu. Ce bouton est fixé à une tige qui vient appuyer sur une barre de ressort ρ en communication habituelle avec un pont ρ″.

Lorsqu'on presse sur le bouton B, le ressort ρ quitte ρ″ et vient s'appuyer sur une butée ρ′ reliée à la terre par l'intermédiaire des bobines de l'électro-aimant.

**Manœuvre électrique à distance des électro-sémaphores de la Compagnie du Nord.** — Voici le programme indiqué et réalisé par la Compagnie du Nord :

Premier cas. — *Manœuvre exclusive d'un point extérieur.* — 1° Le commutateur électrique de manœuvre à distance doit être enclenché avec le levier du disque à distance, afin de réaliser l'enclenchement entre le disque et les appareils numéro 1;

2° On ne doit pas pouvoir manœuvrer ce commutateur tant que la grande aile n'est pas retombée;

3° Quand la grande aile retombe, une sonnerie doit tinter jusqu'à ce que le garde ait remis le commutateur dans sa position normale;

4° On ne doit pouvoir manœuvrer le commutateur actionnant l'appareil nnméro 2, pour débloquer la section en arrière, que si le petit bras s'est bien effectivement développé et si le commutateur de manœuvre de la grande aile a bien été successivement manœuvré et renversé à sa position normale, ou encore si la désolidarisation a été obtenue par la manœuvre du commutateur spécial de désolidarisation;

5° L'enclenchement entre les commutateurs de manœuvre des boîtes numéros 1 et 2 doit se reproduire autant de fois que l'on fait entrer de trains dans la section, même la grande aile étant à l'arrêt;

6° Il faut, enfin, si un train a été garé et si l'on a pu débloquer en arrière sans bloquer en avant, qu'on ne puisse pas, après avoir expédié ce train et l'avoir couvert, supprimer l'annonce d'un train venant du poste précédent avant que, la grande aile étant effacée, on l'ait remise à l'arrêt pour couvrir le deuxième train lorsqu'il passe, ou bien avant qu'on ait pu faire usage du commutateur spécial de désolidarisation, si ce deuxième train doit se garer ou rebrousser.

Deuxième cas. — *Manœuvre sur place et à distance d'un ou plusieurs postes.* — Outre les conditions ci-dessus, on doit réaliser les conditions complémentaires suivantes :

7° La mise à l'arrêt de la grande aile ne doit être possible de l'un quelconque de

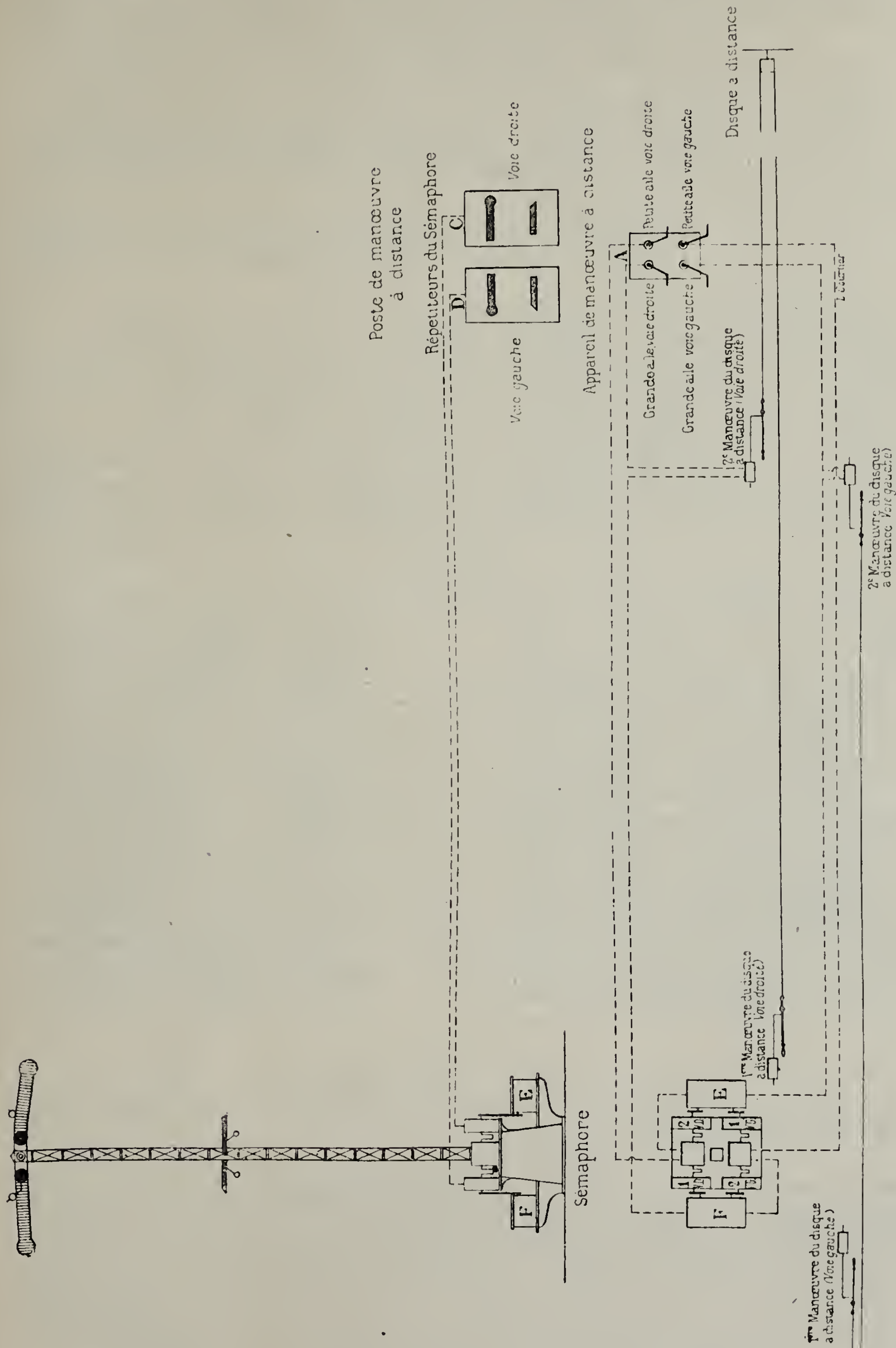



Fig. 41. — Manœuvre électrique à distance des électro-sémaphores.

ces postes de manœuvre que si le disque à distance a été préalablement mis à l'arrêt. S'il

n'existe pas de levier de disque à l'un des postes, le commutateur de manœuvre de la grande aile située à ce poste doit être enclenché avec le levier de l'un quelconque des autres postes, de manière qu'on ne puisse, d'un poste quelconque, manœuvrer la grande aile que si le disque a bien été mis à l'arrêt et qu'on ne puisse effacer ce disque tant que la grande aile est horizontale;

8° Une fois la grande aile manœuvrée par l'un quelconque des postes, ni celui-ci, ni aucun autre poste ne doit pouvoir effectuer une seconde manœuvre du commutateur de manœuvre de la grande aile tant que la section n'est pas devenue libre par la chute de cette grande aile, provoquée par le poste suivant;

9° Quand la grande aile tombe, une sonnerie doit tinter jusqu'à ce que l'agent ait remis le commutateur de manœuvre en position normale, si le retour à la position initiale ne s'est pas produit automatiquement;

10° L'annonce d'un train par le poste précédent doit être répétée à tous les postes.

Le programme ci-dessus a été réalisé comme suit :

Les appareils E et F sont installés au pied du mât sémaphorique (*fig.* 41). La commande se fait à l'arbre de la manivelle de chaque boîte de sémaphore par chaîne de Galle.

L'appareil moteur se compose d'une boîte en fonte contenant un petit moteur dont l'axe porte, à l'une de ses extrémités, une vis sans fin engrenant avec une roue hélicoïdale; sur cette dernière roue est calé un arbre en connexion, par un embrayage système Bovet, avec l'axe de la roue à dents sur laquelle engrène la chaîne Galle d'entraînement, agissant sur la roue dentée de la boîte de manœuvre. Le même moteur commande les trains d'engrenages de deux boîtes contiguës 1 et 2 de manœuvre sémaphorique.

L'énergie électrique est fournie par une batterie d'accumulateurs de 36 ampères-heure composée de 8 éléments à 9 plaques, pouvant débiter 10 ampères sous 12 volts aux bornes du moteur.

Le courant est envoyé au moyen de commutateurs disjoncteurs automatiques en relation avec un commutateur automatique, à double effet, placé dans l'appareil moteur.

Ce commutateur est identique à l'appareil d'enclenchement numéro 2 placé sur le bâti même du sémaphore entre les boîtes numéros 1 et 2. Ces appareils d'enclenchement du type numéro 2, situés aux postes de manœuvre à distance et sur le sémaphore même, sont reliés électriquement entre eux, de manière qu'ils assurent exactement les mêmes enclenchements et déclenchements. Le courant envoyé par le poste de manœuvre à distance traverse donc à la fois le moteur et l'embrayage de Bovet; la grande aile est mise dans la position horizontale.

A ce moment, le courant cesse de passer, le moteur électrique s'arrête et l'embrayage se décolle de la roue hélicoïdale : celle-ci tournant alors folle sur l'arbre, lorsque la grande aile retombe automatiquement à voie libre il ne se produit aucun effet que celui de faire tourner d'un peu plus d'un demi-tour la roue hélicoïdale.

Pour la manœuvre du petit bras, les opérations sont les mêmes, mais les mouvements sont inverses.

La manœuvre durant quatre secondes, la dépense d'énergie est de 1/8 de watt-heure environ; la capacité de la batterie étant d'environ 1/2 kilowatt-heure, on peut effectuer plus de 3000 manœuvres sans changer la batterie.

**Serrure électrique spéciale d'enclenchement réciproque des aiguilles et des disques de la Compagnie du Nord.** — L'appareil d'enclenchement électrique (*fig.* 42) comprend : une règle en fer forgé CC′, munie de 4 encoches *d*, *d*, *d*, *d* et terminée par une chape qui permet de la relier soit à la tringle de manœuvre de l'aiguille, soit au levier du disque. Cette règle porte un doigt avec galet qui transmet le mouvement au cylindre à rainures hélicoïdales M; la course de la règle est limitée par une butée N. Deux cames O, O, solidaires du cylindre M, actionnent les secteurs *m*, *m*, *m*, *m*, qui sont munis de contacts d'enclenchement et de déclenchement. Le support avec secteur Q est réservé à l'enclenchement, et l'autre, Q′, au déclenchement. Une

roue à rochet P et un cliquet P′ empêchent tout mouvement en arrière du cylindre. En cas de manœuvre intempestive d'une des aiguilles enclenchées, il s'établit des contacts avec le disque T et les ressorts $c$, $c'$, $c''$ qui ferment les circuits de sonneries spéciales.

L'appareil comporte, en outre, 8 électro-aimants EE′. Chaque électro-aimant inférieur E commande une armature F pouvant osciller sur l'axe $f$ et pourvue d'un rochet d'enclenchement. L'armature F a une tendance, par son propre poids, à s'éloigner constamment de l'électro-aimant. Chaque électro-aimant supérieur E′ commande une armature F′, solidaire d'un levier H, pouvant

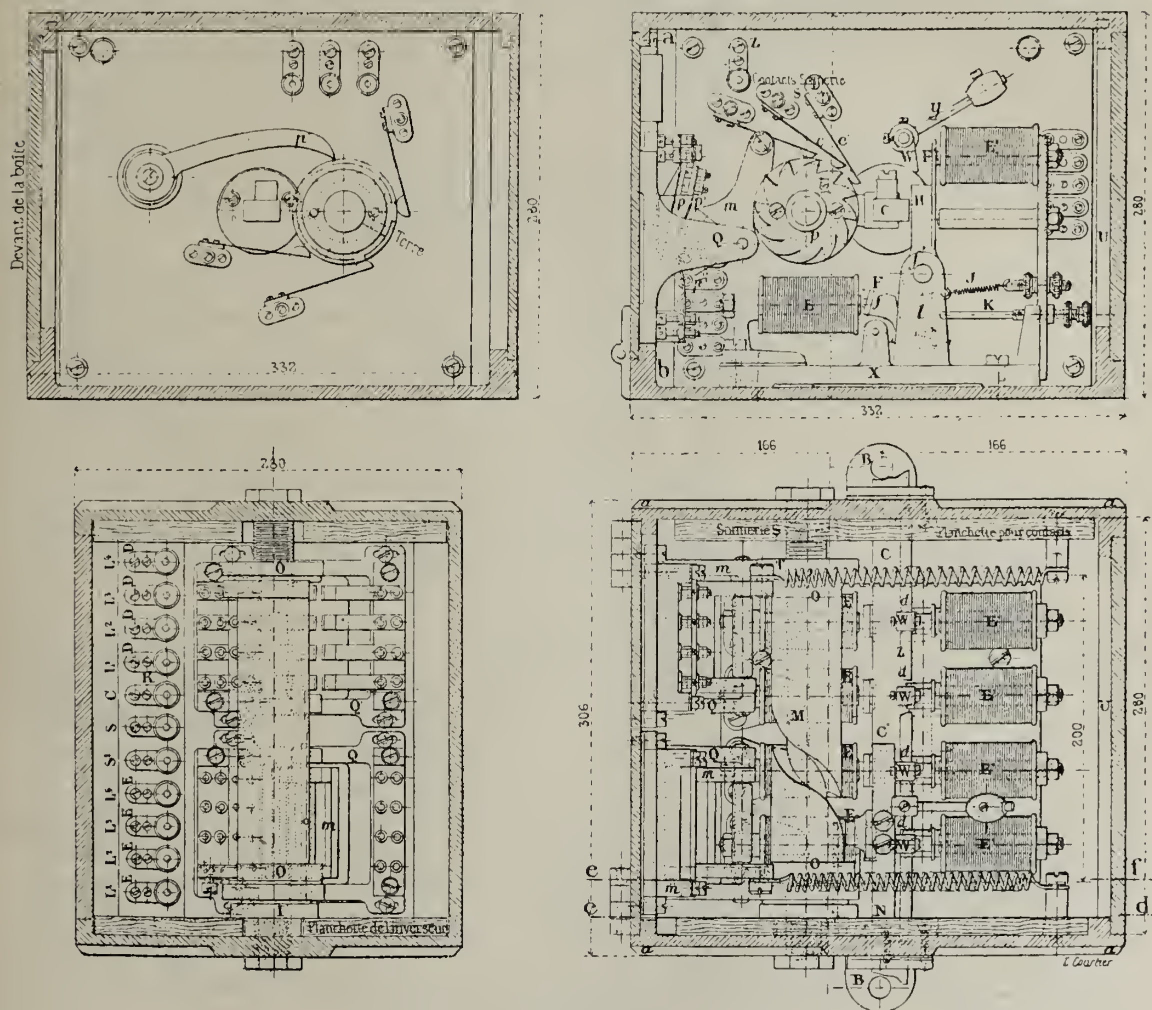



Fig. 42. — Serrure électrique speciale d'enclenchement de la Compagnie du Nord.

osciller sur l'axe $f'$ ; le levier porte à son extrémité inférieure une patte $l$ en acier, ayant une boutonnière dans laquelle est engagé le rochet. Le levier H est normalement éloigné de l'électro par le ressort de rappel J et sa course est limitée par la tige K.

Lorsqu'on envoie un courant dans la bobine de l'électro inférieur E, l'armature F est attirée et le rochet se trouve dégagé de la boutonnière de la patte $l$. Au même moment, le levier H, sollicité par le ressort J, oscille et s'engage dans l'encoche correspondante de la règle CC′. Celle-ci se trouve alors enclenchée et immobilise l'aiguille ou le levier de disque avec lequel elle est reliée.

En faisant passer un courant électrique dans l'électro-aimant supérieur E′, l'armature F′ est attirée, la règle C se trouve dégagée et la patte $l$ se remet en prise avec le rochet.

Dans toute autre position que sa position normale, l'aiguille envoie le courant négatif d'une

pile spéciale dans l'une des deux sonneries par les contacts $c$, $c'$, $c''$ et le tambour T. Dans toute position autre que celle du signal à l'arrêt, le disque envoie un courant positif dans une sonnerie par les contacts $c$, $c'$, $c''$ et le tambour T de son appareil d'enclenchement.

Divers appareils accessoires ont été installés dans le but de renseigner les postes éloignés sur les opérations du poste de commande et, par suite, d'éviter des manœuvres intempestives qui détruiraient les organes des appareils.

D'autre part, afin d'éviter que le poste de commande n'ouvre intempestivement le disque dans le court intervalle pendant lequel les aiguilles auraient été remises momentanément en position normale, on a intercalé sur le circuit deux commutateurs spéciaux à chacun des postes, de commande et commandé, jouant un rôle analogue à celui des désengageurs.

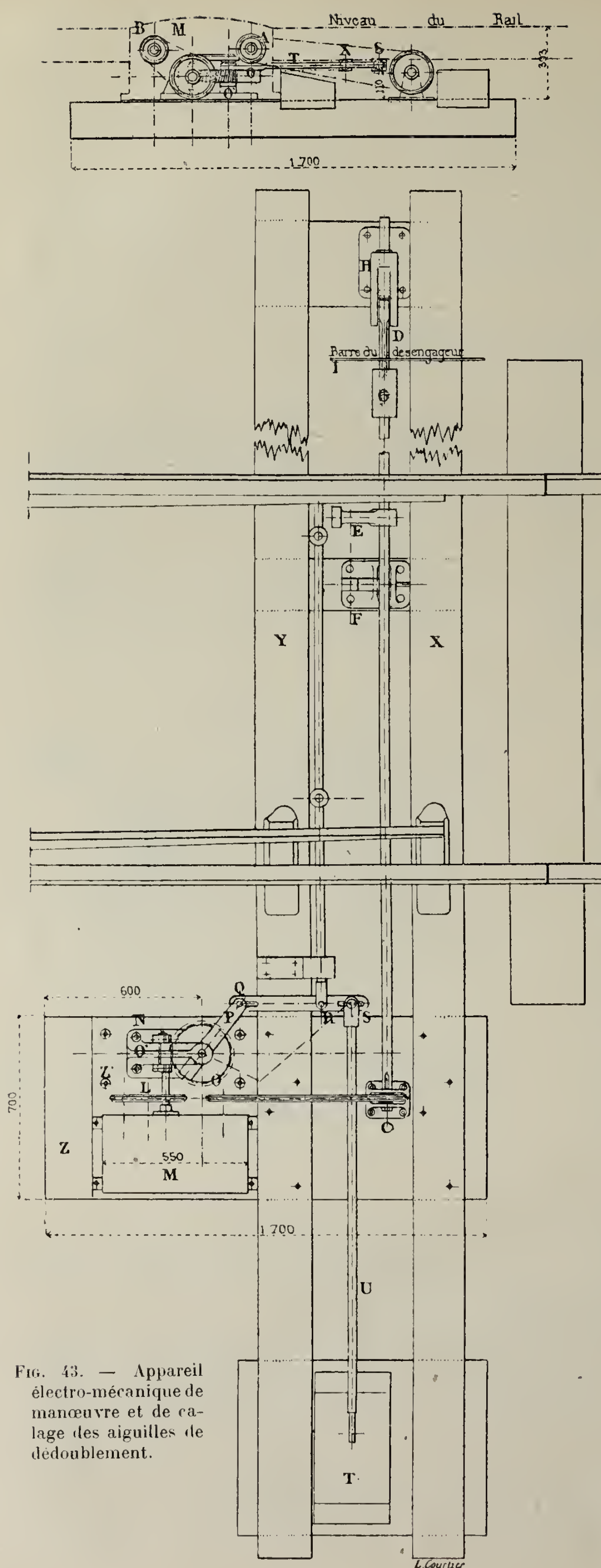



Fig. 43. — Appareil électro-mécanique de manœuvre et de calage des aiguilles de dédoublement.

**Appareil électro-mécanique de manœuvre et de calage des aiguilles de dédoublement de la Compagnie du Nord.** — Cet appareil a été imaginé dans le but de permettre au personnel de manœuvrer à distance et de caler les aiguilles de dédoublement de voie unique, et de faciliter ainsi aux agents l'application des prescriptions réglementaires concernant la visite des aiguilles isolées.

La figure 43 montre la disposition d'ensemble des appareils installés près de l'aiguille.

Le moteur électrique M peut actionner alternativement les arbres A et B munis de pignons Galle. Le pignon A attaque directement l'arbre CD, porte-agrafe qui supporte l'agrafe E et qui passe sous la voie. Cet arbre est guidé par un support à galets F et se termine, en D, par un joint universel le reliant à un

contrepoids de rappel GH, dont un des balanciers agit sur la barre I du désengageur.

Le pignon B du moteur M attaque, par chaîne Galle, une roue dentée intermédiaire, clavetée sur un arbre LN muni d'une vis sans fin engrenant avec une roue O, dont l'axe vertical est maintenu dans une chape O'. Le bras P, fixé sur cette roue, s'articule sur le balancier QRS, dont le point R est rattaché à l'aiguille. Le point S de ce balancier est relié par la tringle U au levier à lentille T, qui permet la manœuvre à la main de l'aiguille.

Quand l'aiguille est manœuvrée par le moteur M, le point S reste fixe et l'extrémité du bras P décrit un arc de cercle. Le point R se déplace en entraînant l'aiguille dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens de rotation de l'arbre B du moteur. Lorsque au contraire l'aiguille est manœuvrée à la main, par le levier à lentille T, le point Q reste fixe et sert de pivot au balancier QRS.

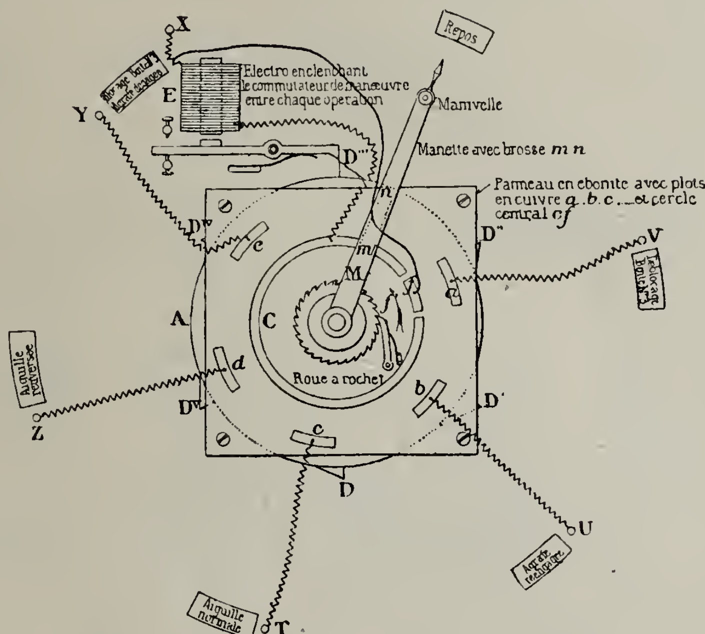



Fig. 44. — Commutateur spécial de manœuvre.

Pour effectuer les manœuvres, on fait tourner le moteur dans un sens en embrayant l'arbre A, l'arbre B étant débrayé. L'agrafe s'efface. On actionne ensuite l'arbre B, l'arbre A restant immobile, ce qui a pour effet de manœuvrer l'aiguille. L'arbre B étant mis en mouvement en sens contraire, l'aiguille reprend sa position primitive.

On replace l'agrafe pour caler l'aiguille en actionnant en sens inverse l'arbre A.

Le moteur reçoit le courant d'une batterie de 6 à 8 éléments d'accumulateurs. Les arbres A, B sont coupés par des embrayages magnétiques de Bovet, de telle sorte que le moteur, en tournant, entraîne l'un ou l'autre de ces deux arbres, suivant que le courant est envoyé dans l'un ou l'autre de leurs embrayages magnétiques respectifs. Le moteur comporte des organes accessoires qui sont : 1° sur chaque arbre A, B, un interrupteur automatique qui coupe le courant quand la manœuvre à produire est terminée ; 2° quatre relais à double enroulement ayant pour effet de fermer le circuit du moteur pour le faire tourner dans un sens ou dans l'autre et lui faire actionner soit l'arbre A, soit l'arbre B.

Le premier enroulement des relais est en fil fin ; il reçoit le courant de pile envoyé par le commutateur spécial de manœuvre placé dans le bureau du chef de gare. Ce premier enroulement ferme le circuit à gros fil du relais, lorsque le courant de pile l'excite. Le courant des accumulateurs arrive alors au moteur, lui fait exécuter la manœuvre, le moteur coupant de lui-même le courant à la fin de l'opération. De cette manière, chaque opération ne peut être exécutée qu'une fois.

Le *commutateur spécial de manœuvre* se compose (*fig.* 44) d'une caisse hermétiquement fermée d'où partent 6 fils X, Y, Z, T, U, V. Un axe manœuvré par une poignée M qui sort seul de la boîte porte : 1° une roue à rochet qui ne permet la rotation que pour le seul sens indiqué par la flèche *f*″; 2° une came A munie de 6 dents D, D′, D″, D‴, D^iv, D^v.

Ces dents peuvent passer successivement devant la butée constituée par l'armature et l'électro-aimant E, ou être arrêtées par cette butée, suivant que l'armature de l'électro n'est pas ou se trouve attirée. La manette M porte un contact isolé *mn* qui peut venir réunir le cercle métallique C avec les plots *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*.

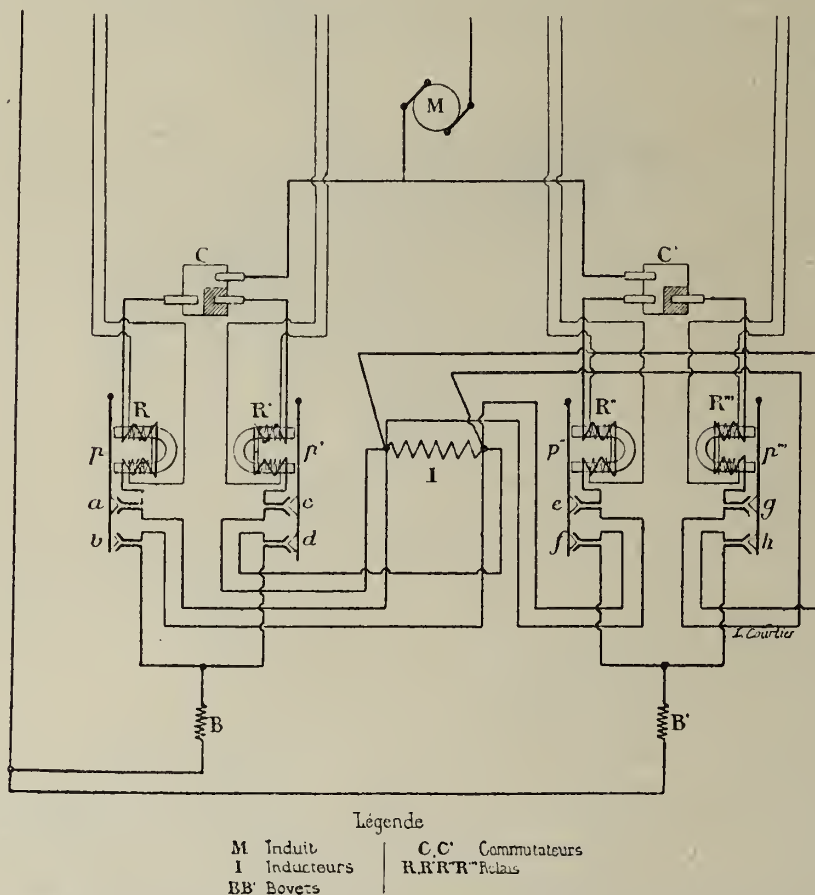



Fig. 45. — Moteur électrique de l'appareil électro-mécanique de manœuvre et de calage des aiguilles.

La manette M porte une aiguille située près de la manivelle de manœuvre et qui indique la position occupée par le contact *mn*. Le courant partant de la pile se rend tout d'abord à la serrure électrique solidaire du levier de manœuvre du disque à distance. Le courant ne peut passer qu'autant que le levier et, par suite, le disque se trouvent mis à l'arrêt. En sortant de la serrure électrique, le courant arrive dans l'électro-aimant E, puis de là au cercle C. Si on amène la manette M sur le plot *e*, le courant de la pile est envoyé, en passant de C par *e*, à l'électro de blocage de la serrure du disque, qui est ainsi enclenché dans la position d'arrêt. De là, le courant arrive dans un des 4 relais de la boîte du moteur électrique M (*fig.* 45). Celui-ci se met en marche, actionne l'arbre A et l'agrafe est dégagée; une grosse sonnerie, placée dans le bureau du chef de gare, se met alors à tinter.

Pendant ce temps, l'électro E a attiré son armature et a bloqué la came A, qui ne peut plus être manœuvrée ni dans un sens ni dans l'autre. Quand l'agrafe est dégagée, les courants sont interrompus, l'électro E devient inactif et la manette M peut être amenée sur le plot *d*. Le

second relais fonctionne ; le moteur tourne en entraînant cette fois l'arbre B qui renverse l'aiguille. La manivelle M, qui restait bloquée par l'électro E pendant cette manœuvre, redevient libre, par suite de la rupture automatique du courant dans le moteur électrique.

Les manœuvres se continuent dans l'ordre suivant : aiguille replacée normalement; agrafe engagée calant l'aiguille ; déblocage de la serrure du disque ; mise de la manette du commutateur spécial à la position de repos.

Pendant toute la manœuvre, la grosse sonnerie dont il a été question tinte et ne s'arrête que lorsque l'agrafe est venue de nouveau caler l'aiguille.

Afin d'éviter que l'électro-aimant E n'intervienne au moment du déblocage de la serrure, ce qui aurait pour effet d'enclencher la manivelle en l'empêchant de revenir sur la position « repos », le plot *f* est relié directement à l'entrée X de l'électro E et, par suite, le courant ne peut passer dans ce dernier.

La caractéristique de ce commutateur est de s'enclencher de lui-même pendant les manœuvres et de ne permettre de faire une opération avant que la précédente n'ait été terminée.

La figure 45 représente la disposition schématique du moteur électrique, des quatre relais et des embrayages magnétiques de Bovet.

**Manœuvre électrique d'aiguille et de signal (Système Ducousso et Rodary) de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée.** — Le but de ces appareils est d'actionner les aiguilles et signaux des

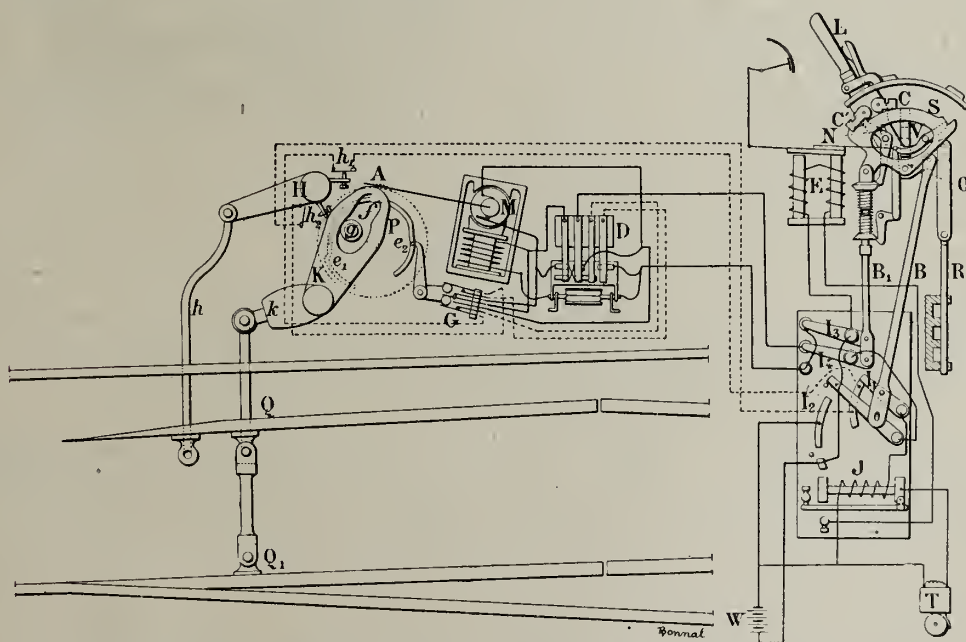



FIG. 46. — Manœuvre électrique d'aiguille et de signal, système Ducousso et Rodary.

gares, au moyen de moteurs électriques, dans un rayon étendu et pour ainsi dire indéfini, avec contrôle impératif du bon fonctionnement de ces organes et leur dépendance réciproque par le moyen d'enclenchements. Ils permettent aussi par là de donner d'un seul coup un itinéraire complet, de façon que toute traversée, tout passage puisse être obtenu par la manœuvre d'un seul levier.

Le principe de leur fonctionnement est le suivant : le levier commutateur de commande envoie, dès le commencement de sa course, le courant au moteur, puis se trouve arrêté en une station intermédiaire, jusqu'à ce que l'organe commandé, aiguille ou signal, ait bien pris la position correspondante. Si, par exemple, l'aiguille est restée entre-bâillée ou si elle n'est pas calée

dans la situation voulue, le levier ne peut achever sa course et, par suite d'enclenchements mécaniques avec les autres leviers qui sont dans sa dépendance, empêche la manœuvre de ceux-ci, c'est-à-dire toute opération sur la voie pouvant présenter quelque danger. Ces conditions sont réalisées de la manière suivante (*fig.* 46) :

La manette L, mobile autour de l'axe O, entraîne directement par une bielle B les commutateurs $I_1$ et $I_2$ qui servent à l'envoi du courant moteur et au retour du courant de contrôle, puis, par l'intermédiaire du secteur S, également mobile autour de O et susceptible d'être entraîné dans un sens ou dans l'autre, par les crochets C et C′ et la bielle $B_1$, l'inverseur $I_3I_4$.

Le courant provenant d'une source W (accumulateurs par exemple) passe par le distributeur D et le commutateur G dans le moteur M qu'il actionne. Celui-ci, au moyen de la vis sans fin A, commande le plateau P portant le galet *g* ; ce dernier, se déplaçant dans le profil *f*, entraîne le levier K, qui, par son extrémité *k*, manœuvre l'aiguille $QQ_1$. Le même plateau P actionne par une nervure $e_1e_2$ le commutateur G, qui, en fin de course de l'aiguille, met l'induit du moteur M en court-circuit, produisant ainsi un freinage énergique.

Lorsque l'on commence à manœuvrer le levier L, celui-ci, déplaçant les commutateurs $I_1$ et $I_2$, envoie le courant au moteur M, qui met l'aiguille $QQ_1$ en mouvement. Mais la course du levier L est arrêtée par la butée de son doigt N contre la partie pleine du verrou V.

Or, dès que l'aiguille $QQ_1$ a quitté le contact du rail, la tringle *h* entraîne le commutateur H, qui rompt en $h_1$ le circuit aboutissant par G à la bobine J, placée dans le bâti des leviers de manœuvre ; son armature, en tombant, ferme le circuit de l'électro-aimant E, et l'armature de celui-ci, soulevant le verrou V, permet au doigt N de passer dans une encoche de celui-ci et, par suite, au levier L de poursuivre son mouvement, jusqu'à ce que le crochet C′ vienne buter contre l'extrémité supérieure alors en saillie de ce même verrou V, ce qui arrête une seconde fois la course du levier L. Mais l'aiguille, ayant achevé sa course, rétablit en $h_1$ le circuit de la bobine J, qui, attirant son armature, coupe le circuit de l'électro-aimant E; le verrou V retombe et le crochet $C_1$ et le levier L achèvent leur course. On voit donc que, pour que le levier L passe entièrement d'une position à une autre, il faut absolument que l'aiguille correspondante effectue son mouvement complet en quittant le contact de l'un des rails, pour reprendre le contact de l'autre.

Ainsi le levier est arrêté dans sa course et, par la barre K, enclenche les autres leviers qui sont dans sa dépendance. Si l'aiguille est entre-bâillée, une sonnerie T se fait entendre.

Chaque levier n'occupe qu'une largeur de 6,5 cm.

**Manœuvre électrique des signaux, aiguilles et appareils de la voie au moyen d'électro-aimants, système Guénée.** — MM. Guénée et Cie ont imaginé une nouvelle disposition d'électro-aimant ayant pour but de permettre de régler à volonté la force en chaque point de la course. On peut donc ainsi, ou régulariser l'effort sur toute la course, ou modifier en chaque point l'effort en suivant un graphique donné pour un même travail total développé par l'électro.

L'électro est, en outre, construit de manière à augmenter le plus possible le flux produit par la force magnétomotrice de la bobine en réduisant à sa plus simple expression l'entrefer existant entre l'armature et la pièce polaire. Par la position de l'armature, la plus grande partie du flux est utilisée pour produire l'effort.

L'électro se compose d'une cuirasse en métal magnétique (*fig.* 47 et 48) formée de deux parties boulonnées ensemble après la pose de la bobine.

Ces pièces servent de passage au flux magnétique en formant cuirasse ; les deux expansions polaires qui les terminent sont très développées, de façon à diminuer la réluctance de l'entrefer.

Le noyau glisse dans un tube de laiton serti dans la carcasse. La modification de l'effort en chaque point de la course est obtenue par la réluctance variable de la partie du noyau se présentant en regard de la pièce polaire. Grâce à cette réluctance, que l'on fait varier à volonté, on gradue le flux magnétique produit selon l'effort à obtenir. L'accroissement

du flux pendant la marche du noyau suit alors une loi dépendant du graphique de marche à obtenir.

Plusieurs artifices ont été employés pour modifier la réluctance du noyau. Celui adopté pour les électros de manœuvre des signaux de la Compagnie de l'Ouest consiste à sectionner le noyau et à interposer des rondelles isolantes d'épaisseur variable.

Grâce à la disposition des expansions polaires et du noyau cylindrique, l'entrefer est réduit le plus possible et presque tous les ampères-tours sont utilisés pour accroître l'effort sur l'armature. Celle-ci se trouve ainsi portée à une induction magnétique voisine de la saturation.

Les électros sont généralement réglés pour un effort constant ou pour un effort un peu supérieur au début de la course, de façon à vaincre les efforts de démarrage. On peut, du reste, rapprocher le diagramme de l'électro d'une courbe quelconque donnée et proportionner ainsi dans les diverses applications l'effort moteur à l'effort résistant.

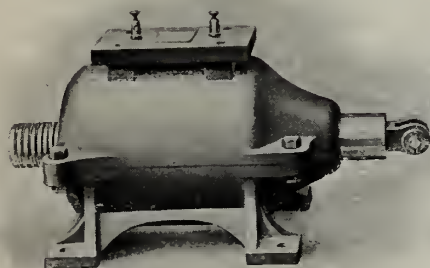


Fig. 47. — Électro-aimant Guénée.

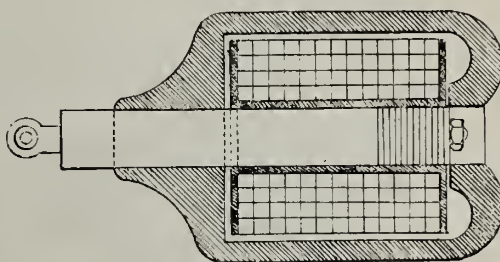


Fig. 48. — Coupe de l'électro-aimant Guénée.

On peut produire, par exemple, un effort de 500 kg, sur une course de 30 cm, sans balais collecteurs ni rouages mécaniques; on réalise ainsi un véritable piston magnétique comparable à un piston hydraulique se déplaçant dans un cylindre sous une pression donnée. Cette solution est même plus simple, puisqu'il n'y a ici ni garniture, ni joint à constituer et à entretenir.

On conçoit que cette disposition réalisant le véritable électro-aimant industriel se prête à un certain nombre d'emplois, tels que la manœuvre des signaux, les commandes de vannes, servomoteurs, débrayages et freins.

Les différents types d'électro-aimants actionnant les signaux et aiguilles de la ligne Courcelles-Invalides ont les caractéristiques suivantes :

| | Force en kg | Course en cm | Ampères | Volts |
|---|---|---|---|---|
| Aiguilles | 200 | 10 | 12 | 90 |
| Pédales | 100 | 8 | 9 | 90 |
| Signaux | 80 | 8 | 8 | 90 |
| Porte-pétards | 35 | 8 | 6 | 90 |

Ces électros sont réglés pour donner un effort uniforme dans toute leur course; l'intensité du courant qu'ils utilisent en marche normale est bien inférieure à celle donnée au tableau, à cause de la force contre-électromotrice qu'ils développent. Ainsi la manœuvre d'une aiguille nécessite 5 ampères environ pendant 1/2 seconde.

Le courant devant être coupé en fin de course des électro-aimants, on a été conduit à créer deux types d'interrupteurs actionnés par les noyaux mêmes. Ces interrupteurs, pour des raisons que nous n'avons pas à examiner, n'ont, paraît-il, pas donné les résultats qu'on en attendait et on a dû les modifier.

Pour les pédales, on a utilisé la flexion des rails pour actionner, par l'intermédiaire d'un relais, des interrupteurs qui réalisent différentes manœuvres de signaux.

Chaque signal est manœuvré soit par un, soit par deux électros.

Les aiguilles sont actionnées par deux électro-aimants produisant l'effort nécessaire à la manœuvre dans les deux positions.

A l'extrémité de chaque électro se trouve placé un interrupteur d'un type spécial qui coupe automatiquement le courant à fin de course.

Comme les deux électros d'un même signal sont reliés mécaniquement ensemble, un de ceux-ci se trouve toujours prêt à être actionné.

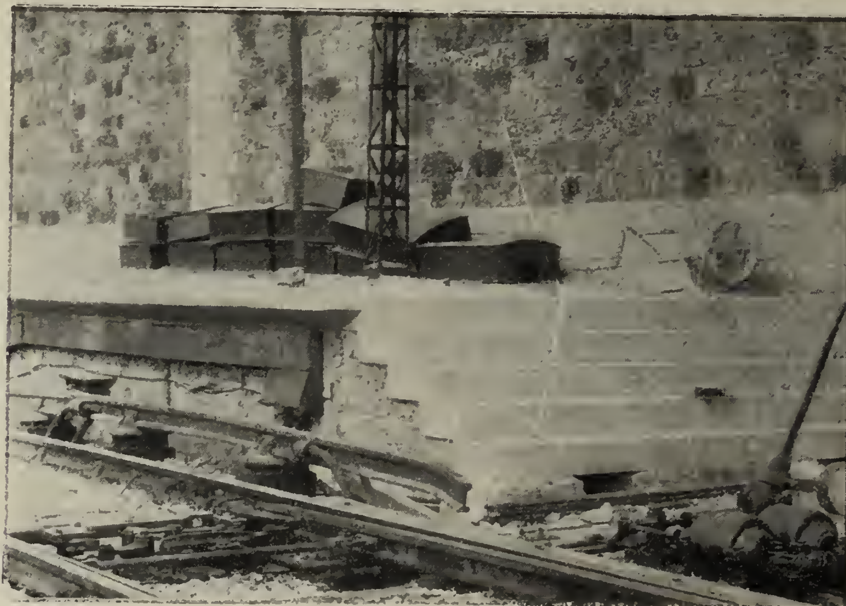


Fig. 49. — Application des électro-aimants Guénée à la manœuvre des aiguilles.

Deux fils de commande et un fil de retour relient chaque appareil au poste de manœuvre.

Celui-ci comprend un combinateur permettant l'enclenchement mécanique des leviers de commande du poste et l'enclenchement électrique des différents circuits de la section ou des sections voisines, en vue de réaliser les conditions du block-système.

Le courant n'est jamais rompu dans le combinateur ni dans le poste, puisque, comme on l'a vu plus haut, l'électro coupe lui-même son courant à fin de course.

Pour les aiguilles, on a dû adopter des rhéostats dont le commutateur permet de couper le courant sur la ligne au moment où le verrouillage se trouve en partie effectué. A ce moment, l'électro-aimant est mis en court-circuit.

Les appareils de la voie comprennent :

*Aiguilles.* — Les électros actionnent un système de leviers qui permet d'obtenir, successivement et par une seule course de l'armature, le déverrouillage de l'aiguille, son changement de position, puis le verrouillage (*fig.* 49).

L'avantage du système est que tout le mécanisme, à l'exception du contrepoids, est enfermé dans une boîte et qu'il suffit d'atteler la tige de manœuvre d'aiguille à la chape fixée à la tige sortant de la boîte. L'effort de l'électro-aimant se fait directement sur la tige de manœuvre sans qu'aucun frottement d'axe ou de glissement se fasse sentir, autre que celui dû au poids des pièces.

Deux interrupteurs, mis chacun à une fin de course, permettent de rompre le circuit lorsque l'aiguille est arrivée à sa place. Ces interrupteurs sont commandés par les verrous et ne peuvent donc rompre le circuit que lorsque l'aiguille est verrouillée. La position des verrous est assurée par un contrepoids qui produit un effort suffisant pour empêcher tout mouvement de l'aiguille en temps normal, mais qui céderait forcément sous la pression énorme produite par les jantes des roues, lorsque l'aiguille est prise en talon.

*Signaux, disques avancés, signaux carrés, signaux de position, etc.* — Suivant les cas, les électros sont placés verticalement ou horizontalement et commandent les appareils par l'intermédiaire de leviers produisant le calage du signal à fin de course.




Fig. 50. — Application des électro-aimants Guénée à la manœuvre des signaux.

La figure 50 représente la partie inférieure d'un signal. Sur le mât sont fixés les deux électros de manœuvre avec leurs interrupteurs. Ces noyaux sont prolongés par des tiges qui se raccordent à un levier pivotant sur un axe horizontal. Perpendiculairement à ce levier se trouve une tige terminée par un poids.

C'est ce poids, dans ses mouvements à droite et à gauche, qui imprime à l'arbre vertical du signal un déplacement angulaire de 90°. La transmission de mouvement se fait très simplement par l'intermédiaire d'une chape calée sur l'arbre dans un plan horizontal.

Pour certains signaux, on a employé un seul électro pour l'ouverture, la mise à l'arrêt étant obtenue à l'aide d'un contrepoids. Cette disposition a été prise dans le but de placer automatiquement le signal dans la position « arrêt » au cas où un dérangement quelconque, électrique ou mécanique, viendrait à se produire.

*Signaux acoustiques.* — *Porte-pétards.* — Deux électros placés en regard actionnent la tige qui avance ou recule les pétards au-dessus du rail (*fig.* 51).

*Pédales.* — On utilise la flexion du rail pour agir sur un levier commandant un relais; ce relais actionne les divers interrupteurs qui produisent la mise à l'arrêt du signal placé immédiatement dans le voisinage de la pédale, ainsi que l'ouverture du signal précédent. On réalise



Fig. 51. — Application des électro-aimants Guénée à la manœuvre des porte-pétards.

ainsi un block-système automatique. Lorsque le signal est mis à l'arrêt par la pédale, l'aiguilleur est averti du changement de position de ce signal et il doit à ce moment manœuvrer son commutateur pour effectuer la mise à l'arrêt, autrement il y aurait blocage de la section, l'ouverture du signal ne pouvant être obtenue lorsque le train passe sur la pédale suivante.

L'énergie nécessaire à toute l'installation est fournie par plusieurs batteries d'accumulateurs Tudor à 120 volts réparties dans divers postes de commande.

La ligne Courcelles-Invalides comporte plus de mille appareils commandés par une vingtaine de postes; mais certaines difficultés matérielles n'ont pas permis de mettre tout le système en exploitation normale; seul, le tronçon Invalides-Champ-de-Mars fonctionne régulièrement et, à bref délai, il en sera de même pour tout le reste de l'installation.

V

# APPLICATIONS AU THÉATRE

PAR A. BAINVILLE

---

### JEUX D'ORGUE

Ces appareils sont, comme on sait, destinés à produire les différents effets de lumière nécessaires sur les scènes de théâtre. Aussi quelques exposants français, désirant montrer leurs appareils en fonctionnement, les avaient installés sur de petites scènes pourvues de décors avec portants, herses et rampes éclairées par des lampes commandées par ces appareils.

Tous ces appareils doivent réaliser certaines conditions que nous allons énumérer rapidement pour l'intelligence des descriptions qui vont suivre.

Nous savons que les jeux de lumière sont obtenus à l'aide de lampes diversement colorées. On a reconnu qu'avec des lampes blanches, bleues et rouges, il était possible de réaliser toutes les combinaisons nécessaires. Il faut, tout d'abord, que la puissance lumineuse de ces lampes puisse être modifiée de façon à passer insensiblement de sa valeur normale à l'extinction ou inversement, c'est-à-dire, par exemple, de la nuit au plein jour, sans que le spectateur observe de brusques variations; ces modifications doivent être obtenues d'ailleurs, suivant les cas, avec une plus ou moins grande vitesse; d'autre part, il est quelquefois nécessaire aussi de procéder à l'extinction ou à l'allumage brusque en partant d'un éclairement quelconque. Enfin, chaque appareil, portant, herse, rampe ou lustre, doit être indépendant, de sorte que des modifications faites sur l'un d'eux n'affectent en aucune façon les autres.

Il est superflu d'ajouter que le jeu d'orgue doit présenter toute sécurité dans son fonctionnement et que sa manœuvre doit être facile, de façon à ne nécessiter qu'un personnel très réduit.

**Jeu d'orgue de MM. Mornat et Langlois.** — Comme dans tous les systèmes similaires, le jeu d'orgue de MM. Mornat et Langlois se compose d'une série d'éléments identiques correspondant chacun à un appareil d'éclairage et commandant par suite un certain nombre de lampes.

L'élément (*fig.* 1) se compose d'un rhéostat dont les touches, au nombre de 100, sont disposées de façon à constituer un collecteur rectiligne N; sur ce collecteur se déplace un frotteur P dont les mouvements sont solidaires de ceux d'un bouton B dit bouton de réglage. Ces deux organes sont rendus solidaires par une cordelette métallique tendue par deux contrepoids Q et J, placés à ses deux extrémités.

Le bouton B est guidé dans une coulisse rectiligne graduée en cent parties. La cordelette métallique passe sur les poulies de renvoi que l'on voit sur la figure et fait un tour complet sur le pignon à gorge E. Ce pignon est fou sur son axe et est monté dans une chape qui, fixée à une de ses extrémités, peut être déplacée par un levier venant buter contre l'autre extrémité. Aux deux points de commande de ce levier sont fixés des galets G destinés à réduire les frottements; F est une came que l'on commande par un doigt et qui sert à la manœuvre du levier.

Un ressort de rappel H ramène le levier à sa position de repos. C'est une roue dentée qui est montée sur un arbre attaqué soit à la main, soit par moteur. Enfin le contrepoids J porte une rainure longitudinale dans laquelle vient s'engager la tige du bouton d'arrêt I.

Pour obtenir sur le circuit commandé par un élément les jeux de lumière que l'on désire, on opère de la façon suivante : l'un ou l'autre des boutons d'arrêt A ou I est serré sur sa coulisse en regard de l'indication qui correspond au résultat final à atteindre, c'est-à-dire à l'intensité lumineuse qu'on désire obtenir des lampes montées sur ce circuit. A l'aide de la came F, que

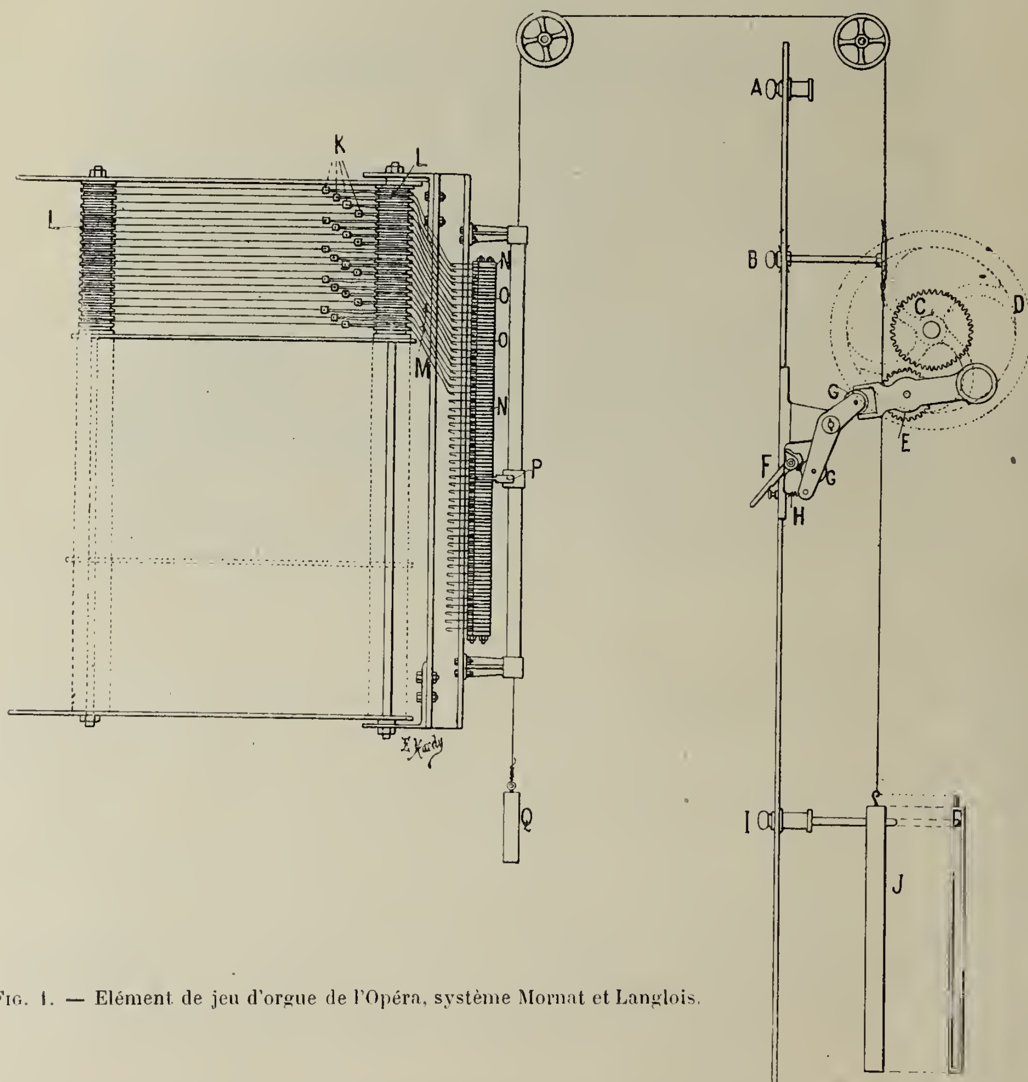



Fig. 1. — Elément de jeu d'orgue de l'Opéra, système Mornat et Langlois.

l'on déplace en soulevant son doigt de commande, on met le pignon E en prise avec la roue dentée C ; cette roue entraîne le pignon, qui communique son mouvement à la cordelette. En effet, cette cordelette, tendue par les deux contrepoids, agit comme un frein sur la gorge du pignon E. Le frotteur P est donc entraîné le long du collecteur et il s'arrêtera à la position correspondant à l'un des boutons d'arrêt A ou I, qui, comme on le sait, peuvent être immobilisés en un point quelconque. A la descente du balai P sur le collecteur, l'arrêt se produit quand le bouton mobile B vient buter contre le bouton fixe A ; ces deux boutons, en effet, sont montés dans la même coulisse. A la montée, l'arrêt est provoqué par le bouton I, qui est placé dans une coulisse indépendante et dont la tige, pénétrant dans la rainure du contrepoids J, limite dans ce sens les mouvements de ce contrepoids. Cet arrêt du contrepoids J détend la cordelette et, par

suite, la rend indépendante du pignon E. Le frottement du contact P sur le collecteur suffit alors à provoquer l'arrêt de ce contact.

Afin que le travail que doit effectuer le moteur pour entraîner la cordelette de manœuvre du contact mobile P soit très faible, les contrepoids Q et J sont équilibrés; cependant, en pratique, Q est un peu plus léger que J, de façon à donner une adhérence suffisante à la cordelette de commande. Le travail du moteur consiste donc à vaincre les résistances passives qui sont réduites au minimum et à entraîner un ensemble qui est presque équilibré, comme nous venons de le voir.

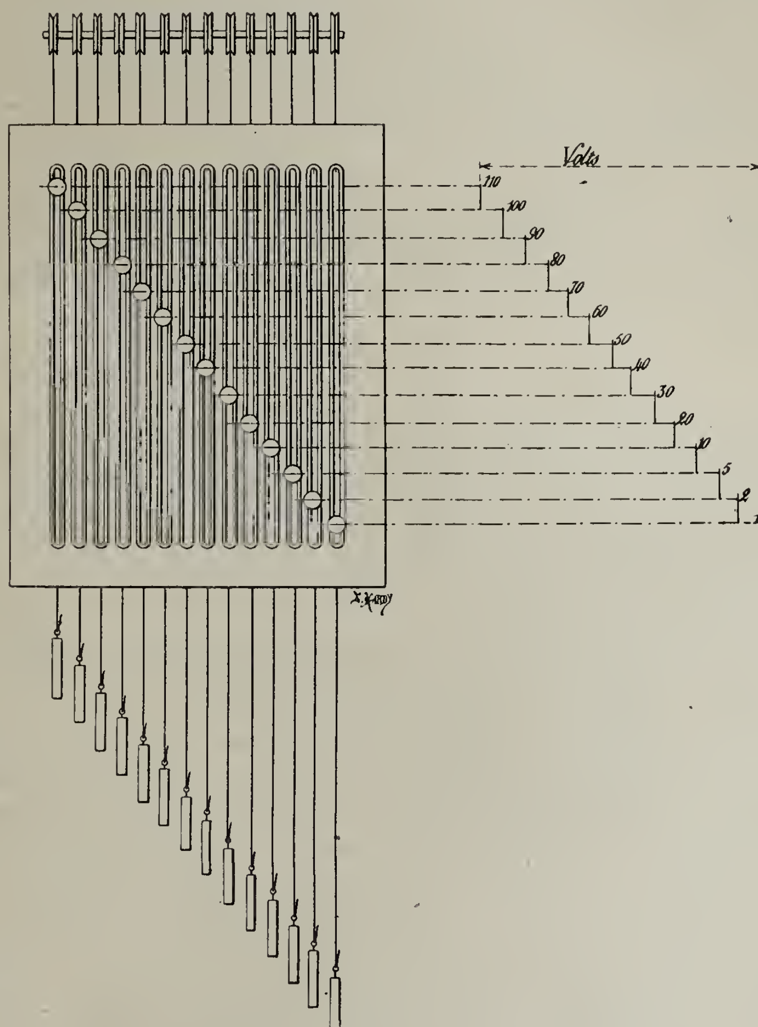



Fig. 2. — Disposition schématique du jeu d'orgue de l'Opéra.

Les moteurs de commande n'attaquent pas directement les arbres sur lesquels sont clavetées les roues dentées C. Afin de pouvoir modifier à volonté la vitesse de chaque arbre, on a intercalé deux cônes intermédiaires, à axes parallèles, mais dont les sommets sont opposés; l'un d'eux, attaqué directement par le moteur, vient à son tour commander le second, qui est relié par une courroie à un petit arbre placé entre les deux cônes. C'est par ce dernier arbre que se fait l'attaque. On peut, avec une vis sans fin, munie d'un volant, faire varier la position de la courroie qui réunit les deux cônes et, par suite, obtenir des vitesses quelconques entre deux limites convenablement choisies. En cas de besoin, chaque groupe peut facilement être mû à la main à l'aide d'un volant monté sur l'arbre des roues dentées.

L'appareil que nous venons de décrire est complété par une série de tableaux réunissant les

interrupteurs à deux directions des différents circuits. Chaque tableau comporte une couleur de lampe.

Chacun des circuits d'un tableau peut à volonté être branché sur le circuit général correspondant ou bien être rendu indépendant des autres; on peut ainsi, sur l'une des trois couleurs employées, en supprimer une portion sans inconvénient pour le reste de cet éclairage.

Avec ce modèle de jeu d'orgue, l'électricien est loin de la scène et a tout loisir pour surveiller ses appareils et exécuter les ordres qui lui sont transmis. La figure 2 représente schématiquement un jeu ainsi préparé.

La manœuvre destinée à obtenir le jeu de lumière demandé consiste, comme nous l'avons vu, à placer convenablement les boutons d'arrêt et à faire l'embrayage des éléments intéressés en amenant le moteur à la vitesse qui correspond à la durée de l'effet. Après quoi, on n'a plus qu'à abandonner l'appareil à lui-même pour qu'il exécute fidèlement les variations de lumière qui ont été ainsi déterminées à l'avance.

**Jeux d'orgue de la Compagnie générale d'Éclairage et de Force.** — Cet appareil se compose de deux parties mécaniquement indépendantes, le rhéostat proprement dit, qui est placé en un endroit quelconque convenablement choisi, et l'appareil de commande électrique à distance.

Nous allons décrire séparément ces deux appareils, puis expliquer le fonctionnement de l'ensemble.

Le rhéostat est constitué par un fil de ferro-nickel de section variable, fixé en zigzag sur deux couronnes maintenues à distance par des entretoises ; il présente l'aspect d'une cage d'écureuil. Cette cage doit pouvoir tourner autour de son axe à des vitesses différentes ; à cet effet, elle est actionnée par un petit moteur électrique dont nous reparlerons plus loin, car il fait partie de l'appareil de commande à distance.

Sous le rhéostat est disposée une cuve en fonte d'une faible profondeur contenant un bain de mercure d'environ 7 mm d'épaisseur.

La cuve est placée à une distance telle du tambour sur lequel sont enroulés les fils que, lorsque ce tambour est mis en mouvement par le moteur dans un sens ou dans l'autre, les fils viennent successivement plonger dans le mercure de la cuve.

Étant donnée la disposition en zigzag de ces fils, chacun d'eux vient toucher le bain d'une façon progressive, de sorte que le ménisque de contact parcourt toute la longueur de chaque élément de résistance et que, pendant la rotation du rhéostat, cette résistance varie, par suite, d'une façon insensible. Le fil métallique a, bien entendu, un diamètre variable, ce qui permet de réduire sa longueur, et les spires sont disposées de façon à rendre les variations de la puissance lumineuse proportionnelles aux déplacements angulaires de la cage.

Le cylindre ne peut effectuer une révolution complète; il ne peut parcourir que 340° d'un bout à l'autre de sa course totale, laissant ainsi un intervalle suffisant entre les deux extrémités de la résistance. Pour un parcours complet du rhéostat, les lampes passent de l'extinction à leur éclat normal, e'est-à-dire de la pleine nuit au plein jour ou inversement.

La course totale de 340° est divisée en sept parties égales, qui correspondent à sept valeurs intermédiaires de la puissance lumineuse.

La manœuvre à distance s'effectue par un manipulateur destiné à actionner les moteurs, qui, comme nous le savons, entraînent les rhéostats, à provoquer l'arrêt de ces moteurs au point voulu, à modifier leur vitesse de rotation et à changer leur sens de marche

Le moteur employé, qui n'a à vaincre que les résistances passives et la résistance opposée par la couche mince de mercure, est de très petite dimension et on a pu le loger à l'intérieur de la cage que forme le rhéostat, de telle sorte que l'encombrement de l'ensemble ne se trouve pas accru et que le moteur est parfaitement protégé. Ce moteur est à excitation indépendante, de façon à en simplifier la construction et par suite à en réduire le prix.

Pour répondre aux conditions imposées que nous avons énumérées, le rhéostat doit pouvoir tourner à une vitesse choisie d'avance en parcourant dans un sens ou dans l'autre une fraction également déterminée de sa course totale, c'est-à-dire des 7/8 d'un tour. Chaque rhéostat doit pouvoir être ainsi actionné indépendamment des autres ou, au contraire, avoir un mouvement solidaire d'un nombre quelconque d'appareils semblables.

La commande à distance doit permettre à l'électricien chargé de ce service de disposer à l'avance le jeu à obtenir, qui se réalise automatiquement dès la mise en route, et de faire également toutes les manœuvres d'allumage et d'extinction des différents circuits à un moment quelconque.

Ces conditions sont réalisées par les différents organes du manipulateur, qui comporte :

1° Un dispositif d'arrêt à fin de course;

2° Un inverseur pour le changement de marche ;

3° Un commutateur pour régler la vitesse;

4° Un interrupteur pour l'arrêt des moteurs en un point quelconque;

5° Un commutateur permettant l'extinction ou l'allumage du circuit correspondant, soit directement, soit en passant par le rhéostat.

Nous allons suivre sur le schéma (*fig.* 3) les différentes manœuvres et voir comment elles sont effectuées en principe.

Nous remarquerons tout d'abord que les circuits de commande des rhéostats sont complètement indépendants des circuits de lumière.

Les moteurs, qui sont, avons-nous dit, à excitation indépendante, sont groupés par séries comprenant les rhéostats de commande des circuits d'éclairage, qui peuvent, à un moment donné, fonctionner simultanément. Les inducteurs d'un tel groupe de moteurs sont montés en série, tandis que les induits sont en dérivation. Un interrupteur E, dit interrupteur d'excitation, sert à fermer le circuit sur le groupe des inducteurs. Sur chaque dérivation d'induit se trouve une manette d'arrêt et de marche Q de ce moteur. Les moteurs d'un même groupe, dont les manettes Q sont sur la marche, peuvent être mis en mouvement en même temps, au moyen de l'interrupteur D ou « démarreur » qui est monté en série avec l'interrupteur d'excitation E, pour éviter que le courant ne puisse être envoyé dans les induits, tant que le circuit des inducteurs est ouvert. Sur chaque circuit d'induit sont intercalés un coupe-circuit P et une lampe témoin L qui permettent à l'électricien de constater si le circuit du moteur est fermé ; cette précaution est nécessaire, puisque les moteurs sont placés à distance. S est un coupe-circuit général, branché sur l'ensemble de la canalisation spéciale des moteurs. Le circuit de chaque induit comporte une série d'appareils reliés mécaniquement entre eux : les inverseurs C et F, qui ont pour mission de changer le sens de rotation, et les commutateurs H, destinés à mettre les moteurs en court-circuit, c'est-à-dire à provoquer leur arrêt.

Ces différents appareils peuvent être placés dans 7 positions différentes qui correspondent aux 7 graduations de la puissance lumineuse des lampes, considérées comme suffisantes en pratique. Ils sont commandés mécaniquement par une manette à crans G qui est mise en mouvement à la main par l'électricien.

A cet effet, la manette G est solidaire de la manette de commande H qu'elle entraîne dans son mouvement; les deux autres manettes des inverseurs C et F sont entraînées par G, à l'aide d'un goujon qui coulisse dans une tringle reliant ces deux manettes.

Le commutateur K, identique à H, est entraîné par le moteur.

Quand l'électricien met la manette G sur le cran 4, par exemple, il entraîne la manette H et les manettes C et F qui se placent également en 4 sur les plots correspondants. Mais, cependant, la position de ces deux dernières manettes C et F dépend du sens de rotation de G; si G est entraîné dans le même sens que pendant la manœuvre qui a précédé immédiatement celle que nous considérons, les manettes C et F franchissent une distance proportionnelle au déplacement de G. Si, au contraire, le mouvement actuel de G est inverse du mouvement antérieur, il y a un retard dans la marche des manettes, retard égal à la longueur de la coulisse

où peut glisser le goujon $j$ ; ce retard est employé à changer la polarité dans le moteur et, par

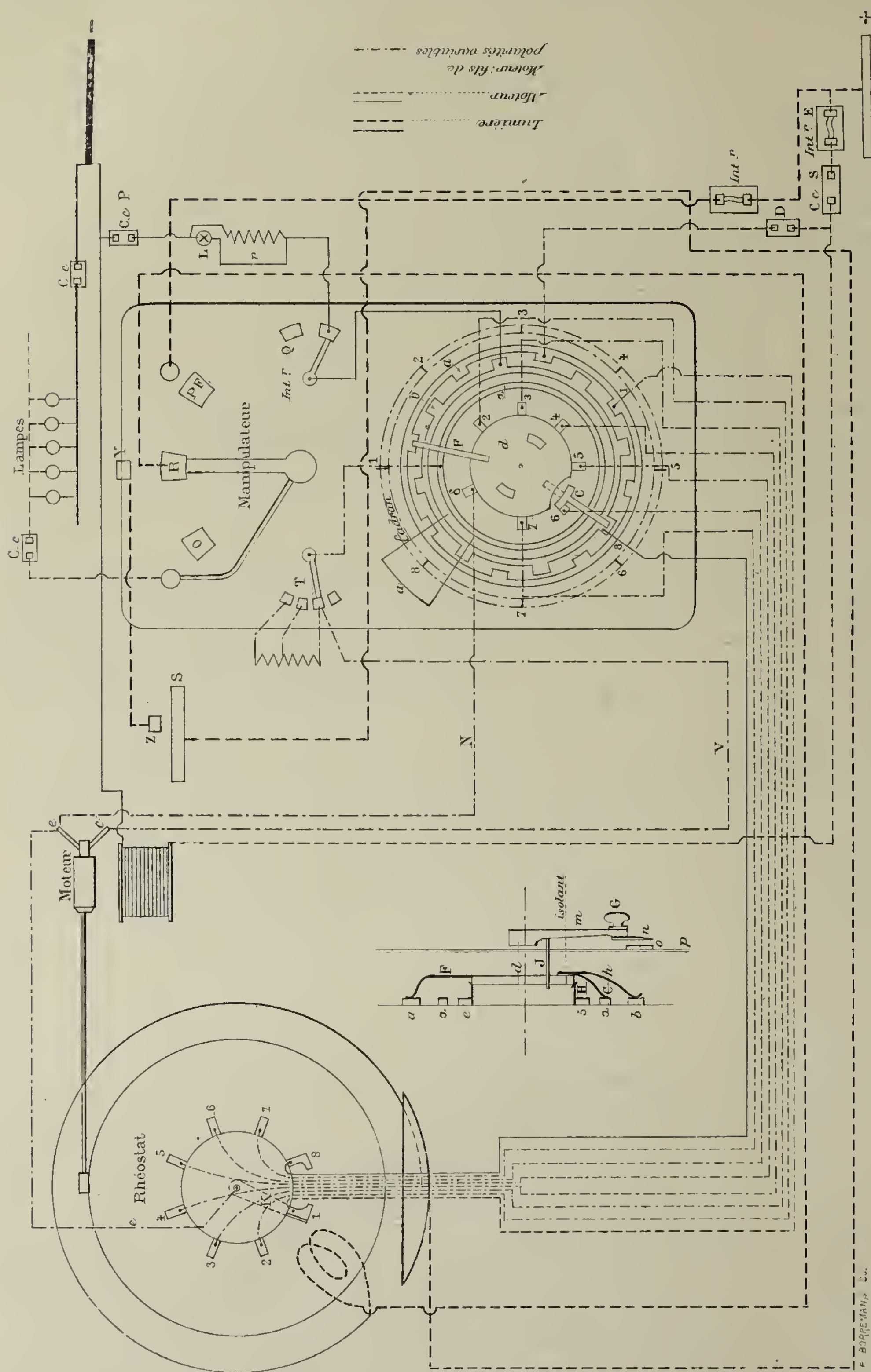



Fig. 3. — Schéma théorique d'un élément de jeu d'orgue de la Compagnie générale des Travaux d'Éclairage et de Force.

suite, à inverser sa rotation, grâce à la disposition suivante que l'on peut suivre sur le schéma : les inverseurs C et F sont munis de deux séries de plots, reliés alternativement aux deux pôles ;

les plots adjacents sont l'un positif, l'autre négatif, et placés à une distance égale à la longueur de la coulisse; comme la distance que franchissent les manettes de ces interrupteurs, entre deux positions successives du manipulateur G, est égale à deux fois cette valeur quand il n'y a pas glissement dans la coulisse, les positions successives des manettes des inverseurs, dans ce dernier cas, correspondront toujours à des plots reliés au même pôle, tandis que le changement de sens dans la manœuvre du manipulateur G ayant pour effet d'introduire un glissement égal à la distance de deux plots successifs des inverseurs, les manettes de ces appareils viendront toujours se placer, dans ce cas, sur leur plot relié au pôle inverse.

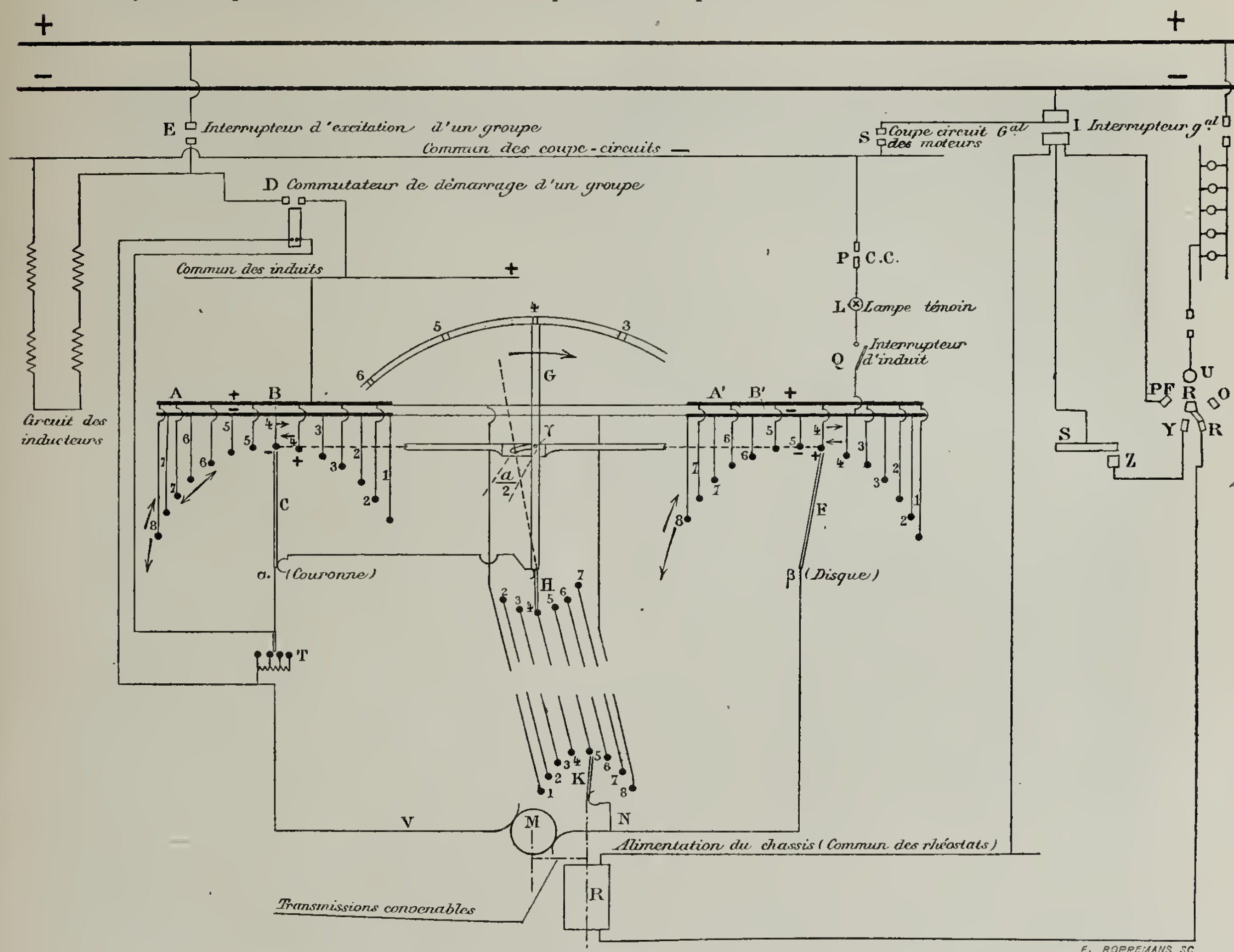



Fig. 4. — Connexions du jeu d'orgue de la Compagnie générale des Travaux d'Éclairage et de Force.

Si donc la manette G est antérieurement en 3, par exemple, et les manettes des inverseurs C et F sur 3 + et 3 — respectivement, quand on avancera le manipulateur sur 4, ces manettes viendront se placer sur les plots 4 + et 4 —; d'autre part, la manette K, commandée par le moteur, qui était restée sur 3, sera entraînée par le moteur jusqu'à ce qu'elle atteigne le plot 4, position pour laquelle le moteur est en court-circuit par le fil qui réunit les plots 4 des commutateurs H et K et par les frotteurs qui relient les manettes de ces commutateurs, l'une avec V, l'autre avec N, sur les fils aboutissant à l'induit du moteur. Si, maintenant, on revient de la position 4 à la position 3 avec le manipulateur, les manettes des inverseurs C et F subiront un retard dans leur entraînement, qui les mettra finalement en contact avec les plots 3 — et 3 +, en inversant le courant dans le moteur.

On voit donc que les mouvements du manipulateur G, dans l'un ou l'autre sens, sont fidèlement transmis au rhéostat et que l'ensemble des appareils que nous venons de décrire réa-

lise une commande à distance parfaite. On remarquera que les extrémités de course ne peuvent être atteintes que dans un seul sens pour chacune d'elles, c'est-à-dire que la mise en court-circuit du moteur pour ces deux points est indépendante de la manœuvre de l'inverseur; c'est une condition évidente, puisque le rhéostat ne fait jamais un tour complet, mais bien des mouvements alternatifs. Le plein jour (position 8) correspondant toujours aux connexions V + et N — et la pleine nuit (position 1) aux connexions inverses V — et N +, la liaison des plots 1 et 8 est donc faite directement sur les pôles correspondants et ce dispositif présente l'avantage d'arrêter sûrement le mouvement du moteur en fin de course, même si cet arrêt ne s'était pas produit au point intermédiaire choisi, par suite d'un dérangement quelconque.

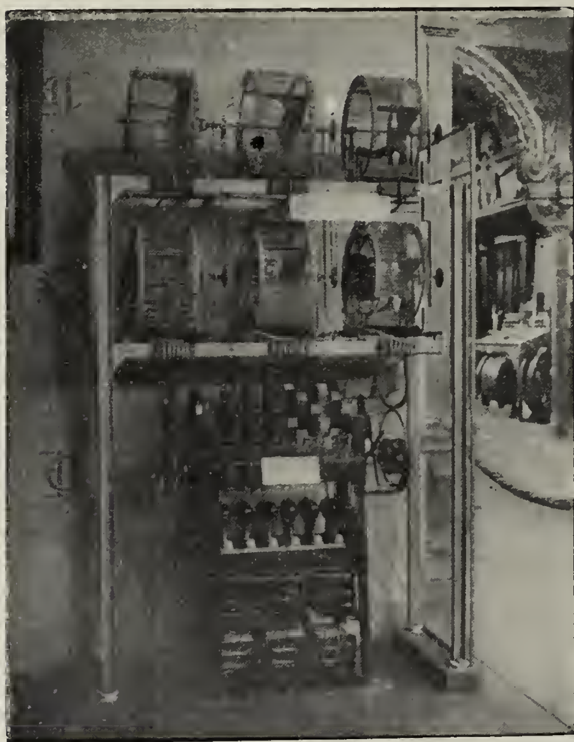


Fig. 5. — Châssis de 6 rhéostats avec leurs moteurs.

Le commutateur T sert à la commande du rhéostat de vitesse du moteur.

Chaque circuit de lampe, tel que celui que commande un rhéostat tournant, est alimenté par un commutateur à 3 directions U correspondant à l'extinction (plot 0) ou à l'allumage (plot PF) du circuit sans passer par le rhéostat, ou enfin aux diverses manœuvres obtenues par le rhéostat (plot R).

Le coupleur SZ permet de mettre en court-circuit les rhéostats d'une série de circuits groupés sur ce coupleur pour réaliser un effet déterminé. Pour pouvoir effectuer cette manœuvre, le plot R du commutateur précédent est relié au plot Y par une fiche et ce plot peut, d'autre part, par le bloc Z, auquel il est réuni électriquement, être branché sur la barre du coupleur S. Les circuits a grouper seront représentés sur le coupleur par des plots, tels que Z, qu'il suffira de réunir avec S au moment opportun.

L'ensemble des appareils dont nous venons de donner la description réalise toutes les conditions du programme posé au début, savoir :

1° Dispositif d'arrêt à fin de course par mise en court-circuit du moteur à l'aide des plots 1 et 8 du commutateur K;

2° Changement de marche par les inverseurs F et C;

3° Réglage de la vitesse par le rhéostat que commande le commutateur T;

4° Arrêt en un point quelconque par les commutateurs H et K;

5° Allumage et extinction indépendants par le commutateur V ou, en passant par le rhéostat, par les deux extrémités de sa course.

Nous allons voir maintenant la réalisation pratique de ces divers appareils.

Le schéma figure 4, qui reproduit les dispositions que nous venons de décrire, nous montre le combinateur G monté avec les manettes C et F sur un axe commun; cette disposition, qui réduit l'encombrement, est facilement réalisable; les plots sont, en effet, placés symétriquement devant chacune des manettes C et F, et ces manettes n'occupent jamais une position semblable sur ces plots; il suffit, par suite, d'isoler les deux manettes entre elles; les pôles communs à ces deux manettes, AA′ et BB′, sont représentés par deux couronnes superposées, isolées entre elles et munies d'encoches placées à l'intérieur sur une couronne, à l'extérieur sur l'autre, qui correspond au plot du schéma figure 3.

La manette F est fixée sur le disque β et reliée au pôle N du moteur d'une façon permanente. La manette C est entraînée, comme F, par la couronne α dont elle est isolée électriquement et elle est en connexion constante avec le pôle V par l'intermédiaire du commutateur de vitesse T et de la couronne α, sur laquelle elle vient continuellement frotter. La manette H, au lieu d'être entraînée directement par le combinateur G, comme dans le schéma figure 3, est solidaire de C; aussi on a dû augmenter la surface des plots du commutateur que commande cette manette, de façon à ce que le contact soit assuré quand la manette C subit le retard correspondant à l'inversion du courant. Ces plots sont représentés par des lamelles numéros 1 à 7,

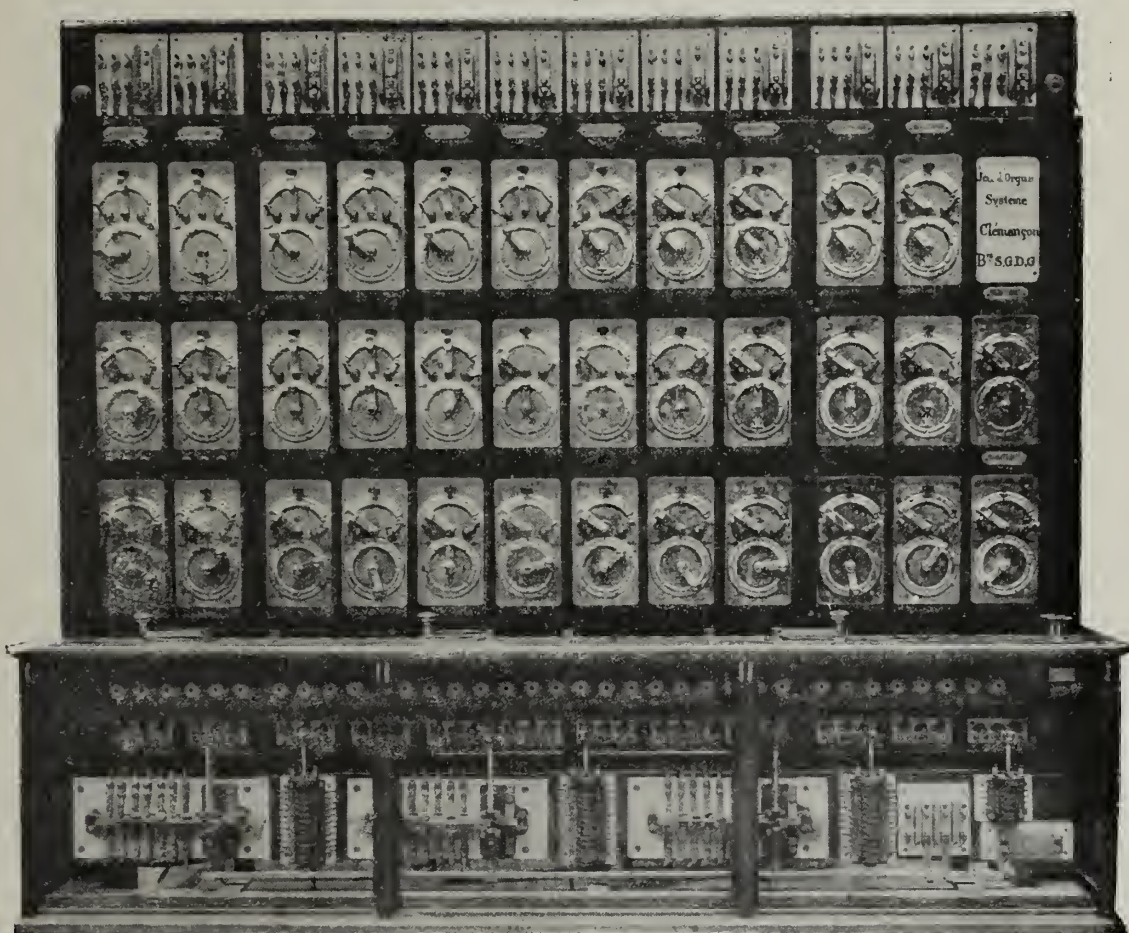



Fig. 6. — Ensemble du jeu d'orgue de la Compagnie générale des Travaux d'Éclairage et de Force.

qui sont disposés autour du disque β; les plots du commutateur correspondant K sont fixés sur un autre disque calé sur l'axe de rotation du rhéostat et tournent, avec ce rhéostat, devant la manette K, qui est fixe et reliée au pôle N du moteur.

Au moment du démarrage, le démarreur D met le rhéostat de vitesse T en court-circuit pendant un instant pour être assuré d'un démarrage franc à toutes les vitesses.

Les 10 fils qui réunissent le manipulateur au moteur sont groupés sous une tresse qui contient, en outre, les deux fils du circuit d'éclairage.

L'ensemble que nous venons de décrire constitue une unité et commande un circuit.

Tous les circuits de même couleur sont réunis sur un même coupleur, de façon à pouvoir être manœuvrés simultanément.

La figure 5 montre un châssis de 6 rhéostats avec leurs moteurs.

La figure 6 représente un ensemble complet qui figurait à l'Exposition dans le stand de la Compagnie générale d'Électricité et de Force.

Dans cet appareil, les trois couleurs sont disposées sur trois rangées horizontales ; on peut voir, au bas de la figure 6, les coupleurs et les commutateurs de mise en marche des moteurs de chaque groupe : blanc, bleu et rouge ; les coupe-circuits généraux des moteurs ; les bornes de connexions des manipulateurs aux coupleurs et aux commutateurs de mise en marche des moteurs ; les coupe-circuits individuels des moteurs et les lampes témoins de chaque unité. A la partie supérieure sont disposés les coupe-circuits pour les circuits de lumière.

Quand les rhéostats peuvent être placés dans le voisinage immédiat des manipulateurs, l'entraînement peut être réalisé mécaniquement ; dans ce cas, les manipulateurs sont légèrement modifiés dans leur disposition mécanique, mais la manœuvre reste exactement la même.

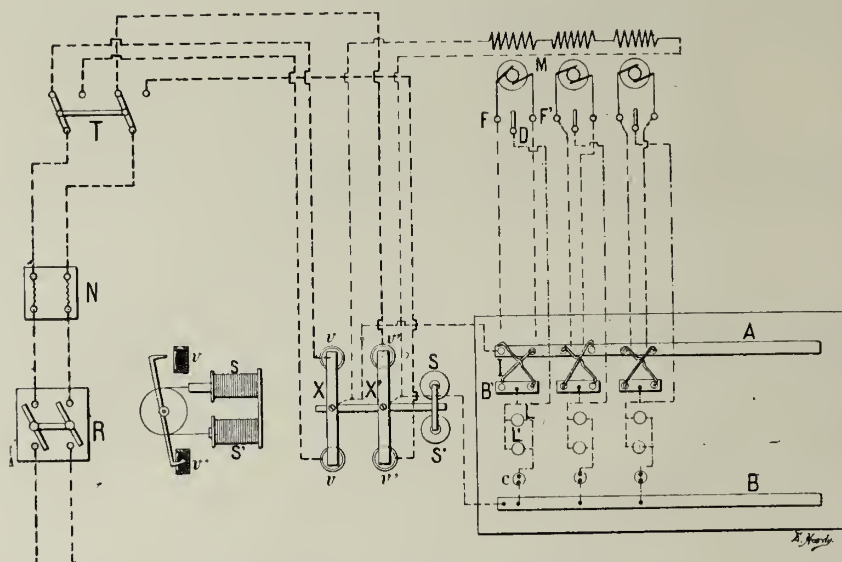



Fig. 7. — Commande automatique des rhéostats du jeu d'orgue du panorama transatlantique.

Un autre modèle de jeu d'orgue complètement automatique était également présenté par la Compagnie générale d'Électricité et de Force et était appliqué, pour réaliser les effets de lumière, au panorama transatlantique et au Maréorama d'Hugo d'Alési.

Ce jeu d'orgue se compose de rhéostats identiques à ceux employés dans le jeu d'orgue précédemment décrit, mus chacun par un petit moteur dont la mise en marche et les arrêts sont commandés par un appareil rotatif spécial qui effectue un tour dans le temps correspondant à la durée de l'effet. Chaque tour de cet appareil reproduit, bien entendu, dans le même ordre et dans le même temps, les mêmes jeux de lumière qui, par suite, peuvent être répétés indéfiniment.

Les figures 7 et 8 représentent schématiquement les dispositifs employés pour réaliser la commande automatique des rhéostats.

M représente un moteur de rhéostat avec son excitation séparée montée en série avec deux autres moteurs semblables. Le circuit de ces inducteurs de moteurs forme un circuit spécial tout à fait indépendant.

Les mises en marche, arrêts ou renversements du moteur, nécessaires pour réaliser les jeux de lumière, sont obtenus en agissant uniquement sur l'induit de chaque moteur.

A et B sont les barres d'alimentation de ces induits. A est une barre de fer qui porte un nombre approprié de paires de godets destinés à contenir du mercure. B est une barre de cuivre sur laquelle sont disposées des bornes d'attache qui permettent de relier cette barre aux coupe-

circuits $c$ et, par l'intermédiaire des lampes témoins L', aux barrettes B'. Chacune de ces barres intermédiaires B' est affectée à un moteur et porte deux godets à mercure semblables à ceux montés sur les barres A.

Entre la barre A et les barrettes B' sont disposés des inverseurs de courant I, à l'aide desquels on peut faire tourner les moteurs dans l'un ou l'autre sens. Ces inverseurs sont constitués par deux tiges en fer coudées à angle droit à leurs extrémités et disposées en croix, comme le montre la figure 7. Ces tiges sont isolées électriquement entre elles et chacune est reliée par un fil isolé à une des bornes de l'induit. L'ensemble du croisillon de l'inverseur I peut osciller autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la direction des barres A et B, de façon à ce que les extrémités des deux tiges viennent plonger simultanément dans les deux godets de droite des barres A et B' ou dans ceux de gauche. On voit facilement, en examinant le schéma, que, suivant le cas, le courant traverse l'induit des moteurs, soit dans un sens, soit dans le sens opposé. Si le croisillon I reste dans la position intermédiaire, auquel cas les quatre extrémités plongent dans les quatre godets correspondants, l'induit est en court-circuit.

Le jeu de cet inverseur commande, par suite, le sens de marche de ces moteurs, la mise en marche et l'arrêt.

D est une lamelle de cuivre montée sur l'arbre du rhéostat tournant, de telle manière qu'elle vienne buter sur l'une des bornes F ou F' du moteur de commande quand ce rhéostat est à fin de course. Cette lamelle, étant reliée à B, sert à provoquer l'arrêt du moteur par mise en court-circuit de son induit.

La manœuvre automatique de l'inverseur I, dont dépendent la mise en marche dans l'un ou l'autre sens et les arrêts du moteur entre les deux positions extrêmes du rhéostat, est obtenue, comme nous l'avons dit, par un appareil spécial.

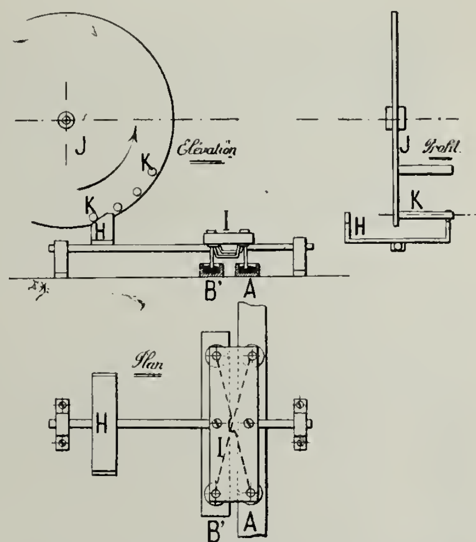


Fig. 8. — Appareil pour la manœuvre automatique de l'inverseur du jeu d'orgue.

Cet appareil est constitué par une série de disques J embrochés sur un axe horizontal parallèle aux barres A et B (*fig.* 8). Chacun de ces disques est percé de trous à sa périphérie, dans lesquels on peut introduire des fiches K qui émergent de la surface du disque sur l'une ou l'autre de ses faces.

La commande des inverseurs I par les fiches K se fait de la façon suivante : L'axe d'oscillation de chaque inverseur porte une butée H ayant la forme indiquée par la figure et qui est disposée pour venir se présenter sous les fiches K. Quand le disque J tourne dans le sens de la flèche, par exemple, et qu'une fiche K se présente, celle-ci, en franchissant le plan incliné taillé sur la pièce H, repousse cette pièce en provoquant ainsi une rotation de l'arbre de l'inverseur. Le sens de cette rotation est différent, suivant que la fiche est sur l'une ou l'autre face du disque correspondant, et, par suite, la position de cette fiche suffit à déterminer le sens de rotation du moteur que commande le disque J.

Quand aucune fiche n'appuie sur la pièce H, un ressort ramène cette pièce dans sa position de repos ; l'induit du moteur est alors en court-circuit.

Avec une série de disques tels que J, garnis de fiches K convenablement réparties, nous pouvons donc commander un nombre égal de circuits de lampes qui seront soumises aux variations d'intensité lumineuse désirées pendant une durée déterminée et au moment prévu ; il faut que nous puissions maintenant prolonger ou arrêter un effet quand il est nécessaire et aussi arrêter l'ensemble de l'appareil.

Ce résultat est obtenu en agissant sur le circuit qui amène le courant aux moteurs.

Ce courant passe successivement par un interrupteur principal R (*fig.* 7), un coupe-circuit bipolaire N et un commutateur bipolaire à deux directions T, avant d'arriver aux barres de distribution A et B.

Pour réaliser l'automaticité de la fermeture et de la rupture de ce circuit, on a intercalé, entre le commutateur T et les barres, un commutateur à bascule constitué par quatre godets en fer $v$, $v'$, contenant du mercure, et deux tiges X, X', qui peuvent osciller autour d'un axe horizontal ; les godets $v$, $v'$ sont reliés chacun à l'un des quatre plots du commutateur bipolaire à deux directions T, et l'axe qui commande les tiges X, X' porte une poulie sur laquelle s'enroule une cordelette supportant les deux noyaux de fer du solénoïde SS'.

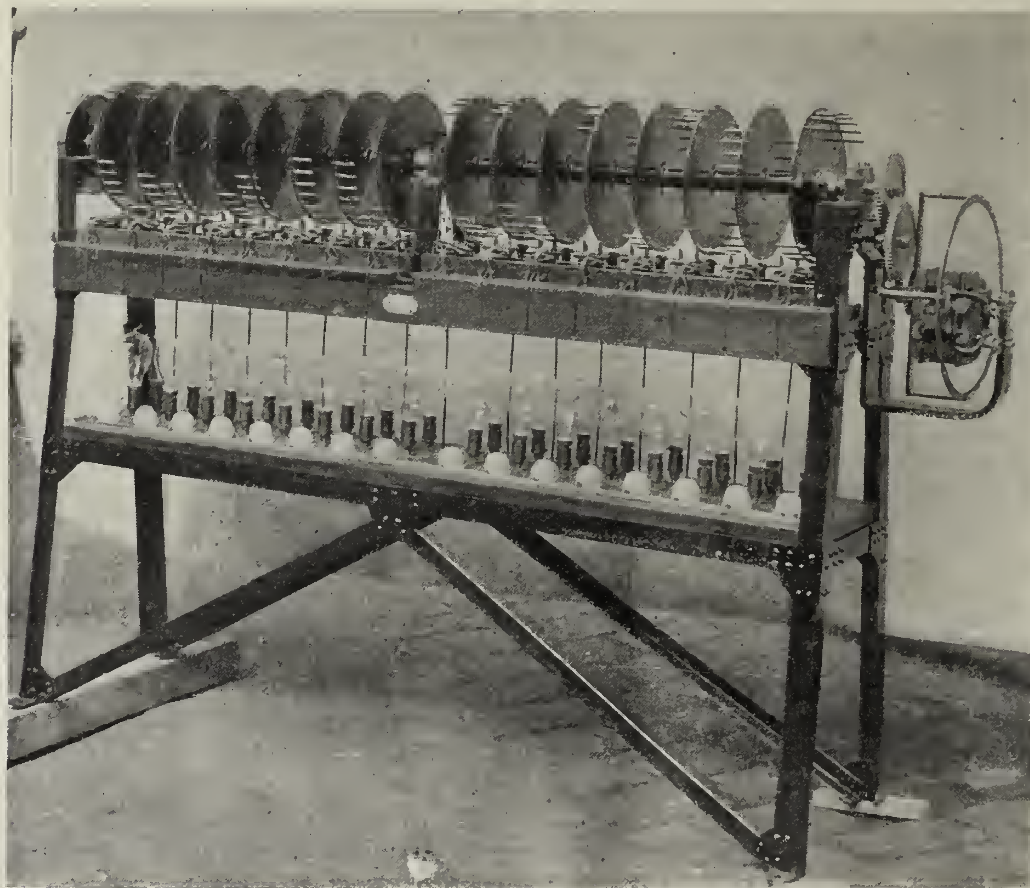


Fig. 9. — Vue d'ensemble des commutateurs inverseurs du jeu d'orgue.

Si les tiges X, X', qui alimentent également le moteur de l'arbre des disques J, plongent dans les godets reliés au circuit, les inducteurs des moteurs qui entraînent les rhéostats ainsi que les barres A et B d'alimentation des induits seront branchés sur ce circuit ; si elles sont, au contraire, plongées dans les deux autres godets, le circuit sera rompu et les moteurs s'arrêteront, quelle que soit la position des inverseurs I.

Pour obtenir ces deux positions, il suffit d'envoyer un courant dans l'un ou l'autre des deux solénoïdes S et S'. A cet effet, un disque spécial est monté sur le même arbre que les disques J qui commandent les inverseurs I; il agit au moment voulu sur des cames qui actionnent l'un ou l'autre des solénoïdes.

Quand l'appareil est ainsi arrêté par la manœuvre automatique de l'interrupteur à bascule XX', il suffit, pour le remettre en marche, de manœuvrer à la main le commutateur T

de façon à relier au circuit les godets de l'interrupteur XX′ qui sont opposés à ceux précédemment branchés ; tout l'ensemble se mettra en marche de nouveau jusqu'à ce que le deuxième solénoïde, actionné à son tour, provoque l'arrêt en ramenant les différents organes de l'appareil à leur position primitive.

Le commutateur bipolaire à deux directions T, qui peut être placé en un endroit quelconque, réalise donc la commande à distance de l'appareil.

Pour prévenir de l'arrêt de l'appareil l'agent chargé de la manœuvre de ce commutateur, il suffit de disposer une lampe témoin entre les deux barres A et B.

La figure 9 est une vue d'ensemble des disques J et des commutateurs inverseurs I qu'ils commandent. On voit sur la droite le moteur qui entraîne les disques ; à gauche, le disque qui porte les contacts destinés à fermer le circuit sur les solénoïdes S ou S′ ; en avant des disques J sont les inverseurs I et en dessous sont disposées les lampes témoins.

**Jeu d'orgue de la Compagnie générale de Constructions électriques.** — Ce jeu d'orgue est du système Vedovelli ; la figure 10 représente un élément complet, dans lequel

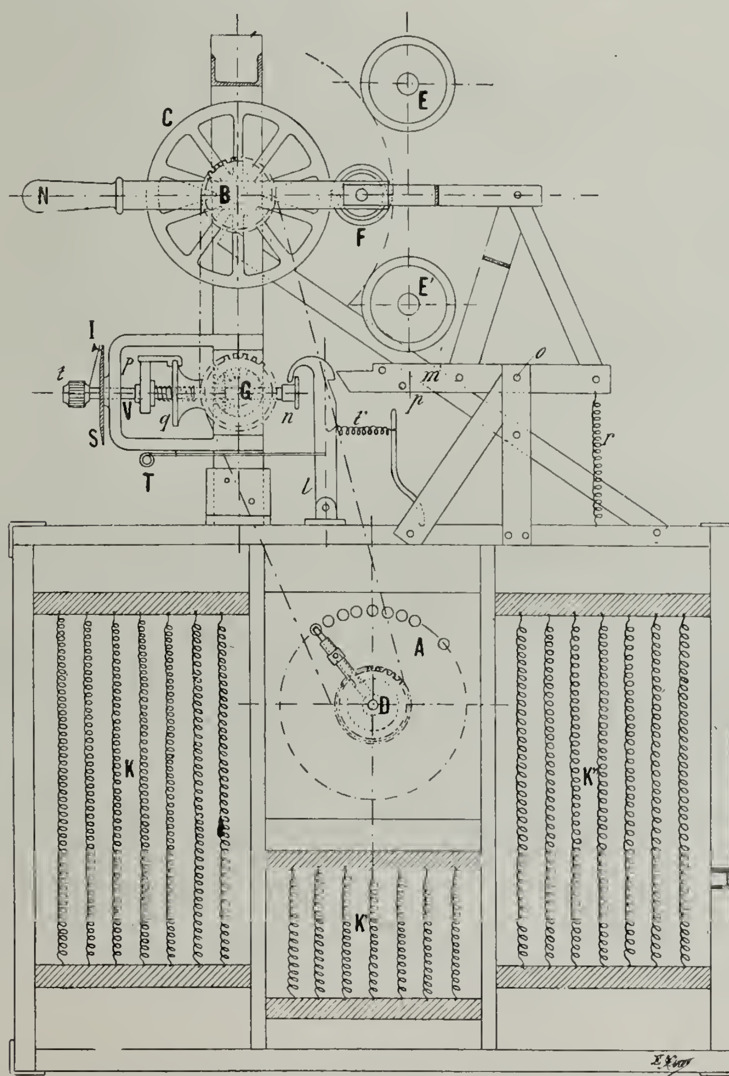



Fig. 10. — Elément de jeu d'orgue, système Vedovelli.

le rhéostat et son manipulateur ont été superposés pour faciliter la lecture du dessin. La figure 11 montre un ensemble d'éléments composant un jeu d'orgue complet.

A (*fig.* 10) est le commutateur du rhéostat, dont les plots successifs sont disposés sur une circonférence. Sur ces plots peut se placer la manette du commutateur calée sur un axe qui porte également une roue dentée D.

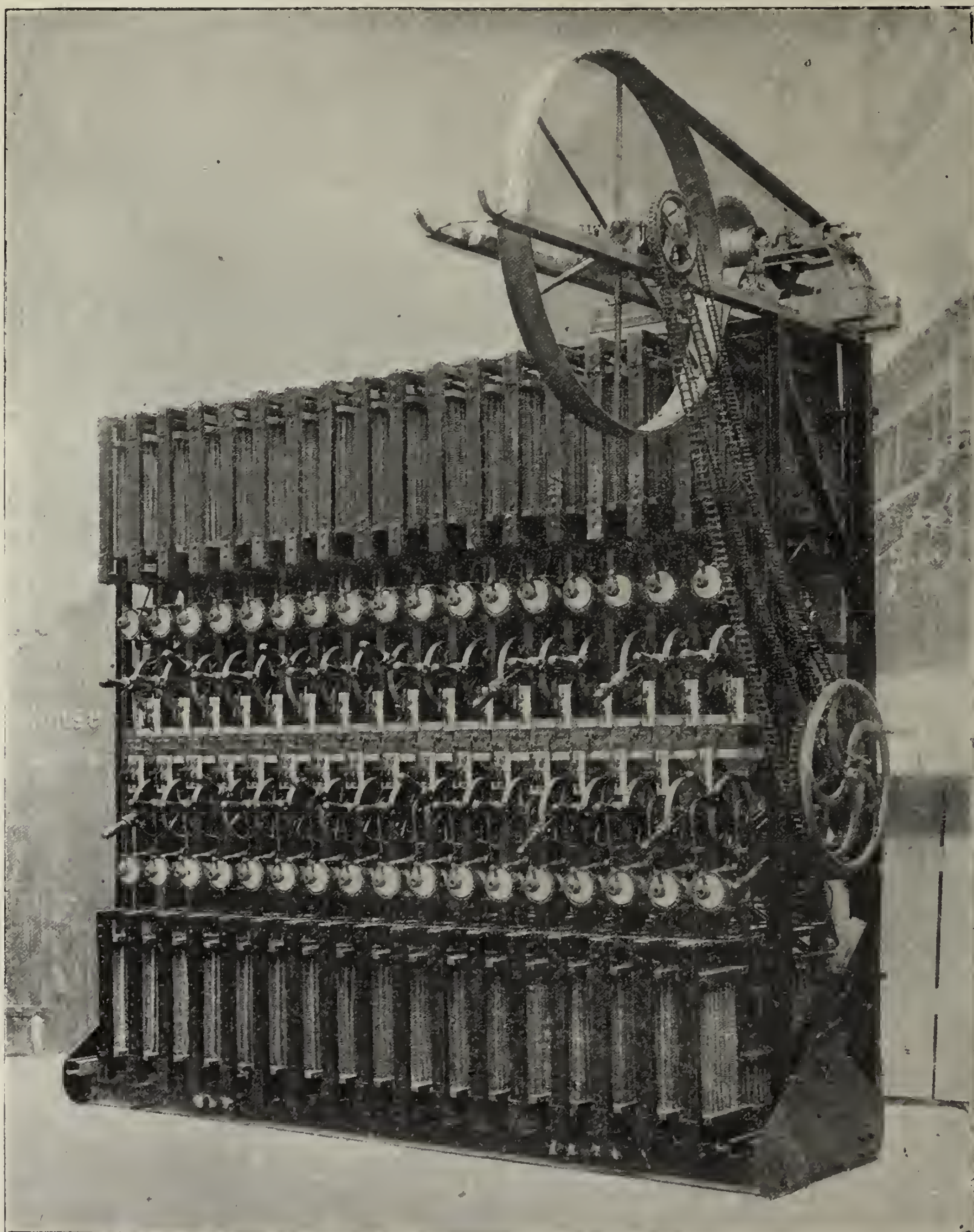


Fig. 11. — Jeu d'orgue, système Vedovelli.

Une chaîne de commande permet de relier cette roue : d'une part, au manipulateur à main C ; d'autre part, à un pignon G, rendant ainsi solidaires les trois axes G, B et D.

Le pignon G actionne, à l'aide d'engrenages coniques, un arbre perpendiculaire sur lequel est fixé un index I qui se déplace devant un cadran S, et il fait tourner cet index d'un angle

égal à celui dont se déplace la manette du commutateur A. Il suffit donc, pour faire varier l'éclairement des lampes branchées sur le circuit qui commande un élément, de manœuvrer convenablement la manette N du manipulateur, cet éclairement augmentant quand on tourne la manette dans un sens et diminuant si on la tourne en sens inverse.

Pour obtenir la manœuvre simultanée d'un nombre quelconque d'éléments semblables dans l'un ou l'autre sens, il faut rendre solidaires ces différents éléments.

A cet effet, deux arbres horizontaux sont disposés le long de l'ensemble et devant chaque élément; chacun d'eux porte un galet; E, E' représentent les deux galets correspondant à l'élément figuré. Les deux arbres et, par conséquent, les deux galets tournent en sens inverse, de telle sorte que, si le galet de friction fixé sur le prolongement de la manette N du manipulateur est entraîné dans un sens ou dans l'autre par l'intermédiaire de la chaîne, il en est de même des axes D et G.

D'autre part, on voit sur la figure 10 que la manette N se prolonge au-delà du galet de friction pour s'articuler à un levier *m* mobile autour du point *o*. Dans sa position d'équilibre, ce levier est maintenu horizontalement par le ressort de rappel *r*; mais, quand la manette N est inclinée, le ressort *r* se tend, le bec du levier s'abaisse et vient s'engager dans le crochet *l* qui le maintient en position par suite de la tension du ressort *t'*. Le levier *m* reste dans cette position tant que le crochet *l* n'est pas déclenché, soit par la tige T qu'on ne peut manœuvrer à la main, soit par un mouvement convenable de la rondelle *n* que porte l'extrémité de l'arbre V.

Cette dernière manœuvre, qui constitue le déclenchement automatique, se produit à un moment choisi à l'avance de la façon suivante :

Sur l'arbre V est calée une pièce *p* qui porte un talon glissant sur le plateau *q*; un cran est ménagé sur la périphérie de ce tableau pour permettre au talon de la pièce *p* de dégager le plateau; ce dégagement a lieu quand, le talon de la pièce *p* se trouvant vis-à-vis du cran, on vient à pousser en arrière, à l'aide du bouton *t*, l'arbre V. A ce moment, l'arbre V est fou et peut tourner à la main; par conséquent, on peut placer l'index I sur l'encoche convenable du plateau S, c'est-à-dire sur le point correspondant à la position de la manette du rhéostat A où l'on désire fixer l'éclairage. L'index I, ainsi engagé dans une encoche, immobilise l'arbre V et la rondelle *n* solidaire de cet arbre; par suite du mouvement de recul qu'on lui a imprimé, il repousse le crochet *l* et lui permet de s'engager dans le bec du levier *m*; si on fait tourner alors les arbres de commande, le volant C est entraîné soit par E, soit par E', suivant la position du galet de friction F; la roue dentée G et le plateau *q* participent à ce mouvement, qui se continue jusqu'à ce que le cran du plateau *q* se présente devant le talon de la pièce *p*. A ce moment, la pièce *p* étant dégagée, l'arbre V est rappelé par un ressort et il reprend sa position primitive; la rondelle *n* étant rappelée en même temps entraîne avec elle le crochet *l*; par conséquent, le levier *m*, qui n'est plus maintenu, reprend sa position d'équibre ; il s'ensuit que le galet F n'est plus en contact ni avec le galet E, ni avec le galet E', et que le levier du commutateur A s'arrête.

On a donc obtenu l'intensité lumineuse convenable sur le circuit correspondant à l'élément considéré, puisqu'on a arrêté la manette du rhéostat A sur la touche convenable.

En manœuvrant de la même façon les différents autres éléments, on parvient donc à obtenir, sur les différents circuits, l'intensité lumineuse demandée.

Toute autre disposition relative des rhéostats des manipulateurs, comparable avec la commande par chaîne, peut être obtenue et on peut, par exemple, éloigner l'une de l'autre ces deux parties de l'appareil.

**Jeu d'orgue de la maison Siemens et Halske.** — Le jeu d'orgue que la maison Siemens et Halske présentait à l'Exposition de 1900 se compose d'un appareil mécanique qui commande à distance, par câble, les rhéostats intercalés sur les circuits des lampes à incandescence.

Le jeu d'orgue comporte une série plus ou moins grande, suivant l'importance de l'installation, d'appareils ou éléments identiques, qui sont groupés de façon convenable pour pouvoir être commandés ensemble ou séparément (*fig.* 12).

Chaque élément comprend l'appareil de commande et son rhéostat.

L'appareil de commande est constitué (*fig.* 13) par une coulisse D qui porte un bouton E qui saillit au dehors du bâti dans lequel est logée la coulisse ; celle-ci se prolonge de part et d'autre par une tige ; à la tige du bas est attaché un contrepoids F ; la tige du haut est fixée à l'extrémité d'un câble qui, par une série de renvois convenablement disposés, va s'attacher à la manette P du rhéostat et supporte, à son autre extrémité, un autre contrepoids Q qui sert à équilibrer le premier et à tendre le câble.

Le bouton E, qui ne peut être déplacé que dans la direction de la coulisse qui lui sert de guide, peut être manœuvré à la main.

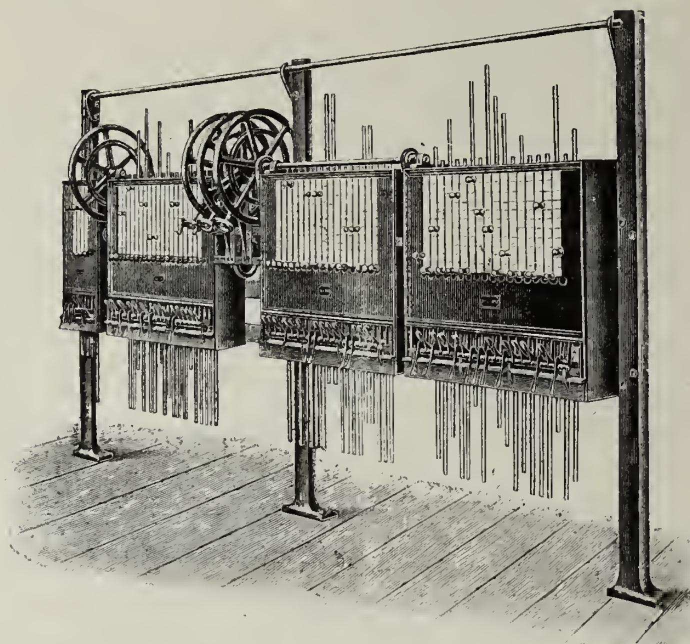


Fig. 12. — Ensemble de l'appareil de commande du jeu d'orgue Siemens et Halske.

Devant la coulisse D se trouve un levier à trois bras G ; le bras horizontal est tiré par un puissant ressort H ; le bras inférieur repose sur le nez d'un taquet J qui peut osciller autour d'un axe horizontal quand on vient à appuyer sur l'extrémité qui saillit du bâti des coulisses.

Quand on appuie sur ce taquet J, du haut vers le bas, il se déplace autour de son axe de façon à dégager le bras inférieur du levier G. Par conséquent, ce levier obéit alors à l'action du ressort H et oscille autour de son axe de rotation, qui est placé à la jonction des trois bras ; il en résulte que le bras vertical supérieur s'incline vers la coulisse, qu'il presse énergiquement contre un cylindre mobile B.

La coulisse est donc entraînée par friction dans l'une ou l'autre direction, suivant le sens de rotation du cylindre mobile. Son mouvement se continuera jusqu'au moment où le bouton E, solidaire de la coulisse, viendra buter contre l'une ou l'autre extrémité de la rainure dans laquelle il est engagé ; la résistance qu'il opposera alors sera suffisante pour provoquer le débrayage de la coulisse D.

Chaque bâti comporte un certain nombre de coulisses montées côte à côte qui peuvent être embrayées ou non par la manœuvre des taquets sur un cylindre commun B. Ce cylindre est manchonné sur l'arbre A et cet arbre est commandé par un volant à main C. La manœuvre

peut également se faire à l'aide du petit volant L. A cet effet, ce volant est monté sur un axe radial M qui peut se déplacer dans la direction du centre du grand volant C; cet axe porte un pignon denté qui, lorsque l'arbre M est à fond de course, vient engrener sur une couronne à denture conique, solidaire du grand volant C; la manœuvre obtenue par le petit volant L peut être parfaitement régulière. Dès qu'on lâche ce petit volant, il retombe et se débraye automatiquement.

Les rhéostats intercalés sur chaque circuit de lampes sont en fil métallique, bien isolés des cadres en fer sur lesquels ils sont enroulés.

Un commutateur N, formé de lamelles de cuivre isolées, sert à fractionner la résistance totale de chaque rhéostat. Ce commutateur est soutenu par un support en fonte solidement vissé au cadre du rhéostat.

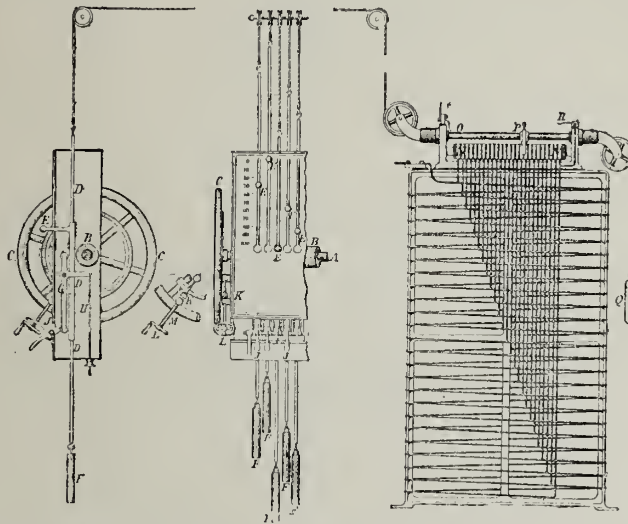


Fig. 13. — Détails de l'appareil de commande du jeu d'orgue Siemens et Halske.

Sur ce commutateur se déplace un curseur P, guidé par un tube O, dont il est isolé. Les déplacements du curseur sont, comme nous l'avons dit déjà, commandés par le câble métallique fixé à la coulisse D, et sont, par conséquent, solidaires des déplacements de la coulisse. R est un interrupteur à rupture brusque qui est manœuvré par le curseur P si, par une cause accidentelle, celui-ci vient à franchir la dernière touche du commutateur N.

Les cadres de résistance sont groupés côte à côte sur un fort bâti.

Sur le devant du bâti qui contient les coulisses D et le long des rainures où se déplacent les boutons solidaires E, on a tracé une graduation qui correspond à la valeur de la différence de potentiel aux bornes des lampes quand la portion du rhéostat, correspondant aux différentes positions des boutons, est intercalée dans les circuits des lampes.

Les jeux de lumière peuvent être préparés à l'avance en mettant en position convenable les boutons des coulisses; on peut, en effet, passer d'une valeur initiale de l'éclairement des lampes à la pleine lumière ou à la nuit, suivant le sens de rotation de l'arbre A. On peut, en outre, embrayer ou débrayer un nombre quelconque de coulisses pendant la rotation de l'arbre A et, par conséquent, faire varier l'éclairement sur chaque circuit, indépendamment des autres ou, au contraire, maintenir cet éclairement à une valeur constante.

# TABLE DES MATIÈRES

## QUINZIÈME PARTIE

## APPLICATIONS DIVERSES

### I

### Applications aux mines



### II

### Applications à la marine

III

## Applications à l'horlogerie



IV

## Applications aux chemins de fer

V

### Applications au théâtre



---

Tours. — Imprimerie Deslis Frères, rue Gambetta, 6.

TOURS, IMPRIMERIE DESLIS FRÈRES.